

## 超音波加工に関する研究

著者	斎藤 修
学位授与機関	Tohoku University
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/55273">http://hdl.handle.net/10097/55273</a>



# 博士學位論文

論文題目 超音波加工に関する研究

提出者 東北大学大学院工学研究科

機械電子工学 専攻

学籍番号 8D 166

氏名 斎藤 修



指 導 教 官	庄 司 克 雄 教 授
審 査 委 員 (○印は主査)	○ 庄 司 克 雄 教 授 1 清 野 慧 教 授    2 長 南 征 二 教 授 3 厨 川 常 元 助 教 授    4 _____ 教 授

- 備考(1) 外国人留学生は、国籍を記入すること。
- (2) 履歴事項は、大学入学から年次にしたがって記入すること。
- (3) 博士課程の修了年月日は、学位記授与式年月日を記入すること。



①

東北大学博士学位論文

超音波加工に関する研究

東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻

斎藤 修



## 目 次

### 記号表

第1章 序論	1
1.1 超音波加工の原理と特徴	1
1.2 本研究の背景	5
1.3 本研究の工学および工業的意義	10
1.4 本論文の構成と概要	12
第2章 超音波加工機の構成と仕様およびホーンの設計	15
2.1 緒言	16
2.1.1 超音波加工機	16
2.2 ホーンの種類および設計	17
2.2.1 ホーンの種類	18
2.2.2 ホーン的设计	21
2.2.3 ホーン寸法の計算	24
2.3 工具と砥粒の特性	26
2.4 結言	29
第3章 超音波型彫り加工における加工の停滞現象について	30
3.1 緒言	30
3.2 実験装置および実験条件	30
3.2.1 超音波加工機	30
3.2.2 ホーンおよび工具	30
3.2.3 実験条件	31
3.3 加工速度に対する工具径の影響	32
3.4 加工クリアランス	37
3.5 加工孔底面の突起生成	41
3.6 結言	44
第4章 加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動	45
4.1 緒言	45



4.2	実験装置および実験条件	45
4.2.1	超音波加工実験	45
4.2.2	工具・工作物間の砥粒の採取方法	47
4.2.3	工具・工作物界面における砥粒挙動の観察	47
4.3	実験結果および考察	49
4.3.1	加工深さと突起高さの変化過程	49
4.3.2	砥粒の粒径分布	54
4.3.3	砥粒の挙動	57
4.4	突起成長のメカニズム	59
4.5	結言	60
第5章 工具・工作物間におけるキャビテーションの発生と対策		62
5.1	緒言	62
5.2	キャビテーションの観察と加工実験	62
5.3	実験結果	63
5.3.1	パイプ状工具によるキャビテーションの発生	63
5.3.2	パイプ状工具による加工速度と加工孔断面形状	65
5.3.3	加工液の違いによる加工速度の変化	68
5.3.4	工具引き上げ動作による突起高さの減少	72
5.4	結言	75
第6章 結論		78
本研究に関する論文および口頭発表		81
謝辞		83



## 記号表

記号	意味
$S_1$	ホーンの大端面積 $\text{cm}^2$
$S_2$	ホーンの端面面積 $\text{cm}^2$
$S_x$	エクスポネンシャル部大端面側より $x$ なる位置の断面積 $\text{cm}^2$
$D_1$	ホーンの大端面直径 $\text{cm}$
$D_2$	ホーンの端面直径 $\text{cm}$
$D_x$	エクスポネンシャル部大端面側より $x$ なる位置の直径 $\text{cm}$
$\rho$	ホーン材料の密度 $\text{g/cm}^3$
$c$	ホーン材料中での音速 $\text{cm/s}$
$f$	ホーンの共振周波数 $1/\text{s}$
$\omega$	ホーンの共振角周波数 $= 2\pi f$ $1/\text{s}$
$m$	工具の質量 $\text{g}$
$m_t$	工具の等価質量 $\text{g}$
$\alpha$	波長定数 $= \omega / c$ $1/\text{cm}$
$l$	半波長共振するホーンの長さ $\text{cm}$
$\Gamma$	$= \frac{S_2 \rho c}{\omega m_t}$
$\Lambda$	質量係数
$\lambda$	ホーン材料中の超音波波長 $= c / f$ $\text{cm}$
$\rho_t$	工具材料の密度 $\text{g/cm}^3$
$c_t$	工具材料中での音速 $\text{cm/s}$
$l_t$	断面一様な棒状工具の長さ $\text{cm}$
$\alpha_t$	$= \omega / c_t$ $1/\text{cm}$
$u_1$	ホーン大端面の振幅 $\text{cm}$
$u_2$	ホーン小端面の振幅 $\text{cm}$
$u_x$	エクスポネンシャル部大端面側より $x$ なる位置の振幅 $\text{cm}$
$M$	振幅拡大率



## 記号表

記号	意味
$h_p$	突起高さ $\mu\text{m}$
$f_p$	工具送り量 $\mu\text{m}$
$c_p$	加工クリアランス $\mu\text{m}$
$a_p$	加工深さ $\mu\text{m}$
$t_p$	工具磨耗 $\mu\text{m}$



# 第1章 序論

## 1.1 超音波加工の原理と特徴

超音波加工とは、図 1.1 に示すように砥粒を介して工具と工作物を接触させ、工具に超音波振動を付与しながら加圧し、工作物に対して工具の形状を反転転写する加工法である。砥粒と接触した工作物表面には、工具の超音波振動による衝撃力が砥粒を介して作用するため、微細な破碎が起こる。1回の破碎による除去量はわずかであるが、単位時間あたりの繰り返し数が非常に多いため、実用上十分な加工速度を得ることができる。脆性材料のように大きな塑性変形を伴わないで破碎する材料に対しては、このような衝撃加工法は高能率加工として特に有効な方法である。

超音波加工機は図に示すように発振器、磁歪振動子、振動拡大用コーンとホーンおよび工具から成り立つ振動系で構成される。超音波発振器から 16~30kHz 程度の高周波電力を振動子に供給することにより、振幅数  $\mu\text{m}$  の超音波振動を発生させる。しかしその振幅は加工に供するには小さすぎるため、必要に応じてコーンおよびホーンにより振幅を拡大させる。通常は数十  $\mu\text{m}$  の振幅にまで拡大される。ホーンの先端には、目的に応じた形状の工具がロウ付け法などにより強固に固定されており、最終的に振動は工具先端に伝達される。

一方、砥粒はスラリの状態で供給される。すなわち水や油などに砥粒を混合した加工液（スラリー）を、工具と工作物間の隙間に供給する。通常、砥粒として炭化ホウ素 ( $\text{B}_4\text{C}$ )、炭化ケイ素 ( $\text{SiC}$ ) そしてアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) などが使用される。これらの砥粒は、工具の超音波振動によりエネルギーを受け、工作物に影響を及ぼす。これまでに超音波加工における工作物除去のメカニズムに関しては次のように、いくつかの作用が同時に起こっているものと考えられている。(1)工具が砥粒を介して衝突するときに発生するチップングにより、工作物が除去される<sup>1) 2)</sup>、(2)加工液中に浮遊している砥粒が工具と衝突し、さらにそれが工作物に衝突して加工が進行する<sup>3) 4) 5)</sup>、(3)キャビテーションによる気泡の破裂が工作物表面を浸食（加工）する、などの作用である。しかし多くの研究が行われ、(2)(3)の作用はほとんど無視でき、(1)の作用でのみ除去が進行しているものと考えられている。その結果、超音波加工では図 1.2 に示すように工具の断面形状どおり



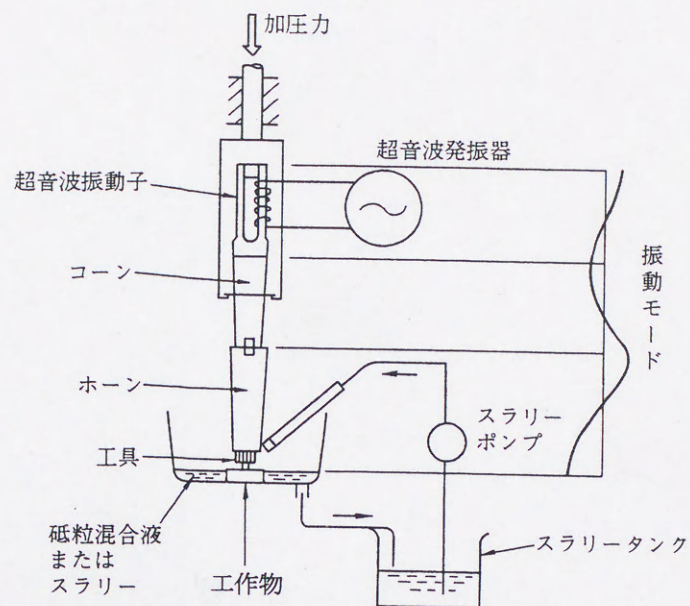


図 1.1 超音波加工の原理

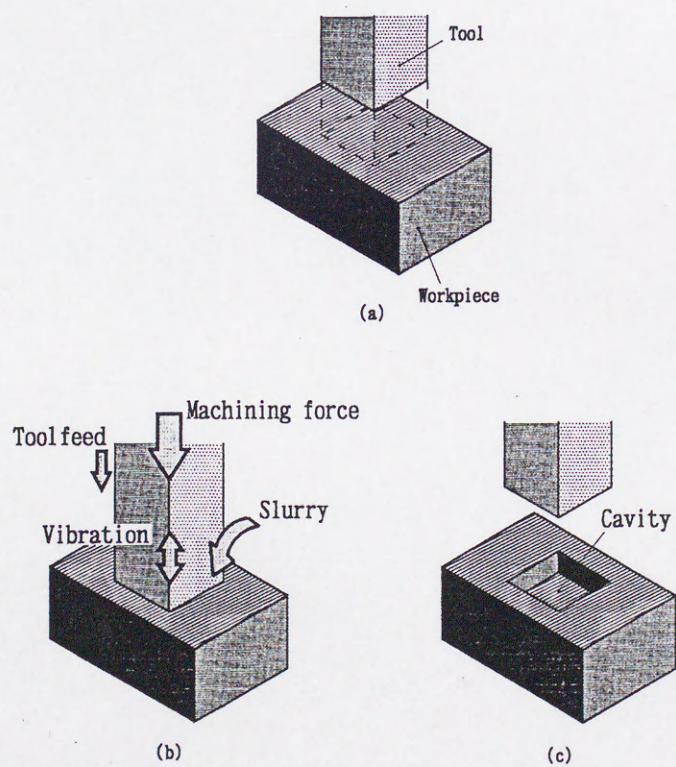
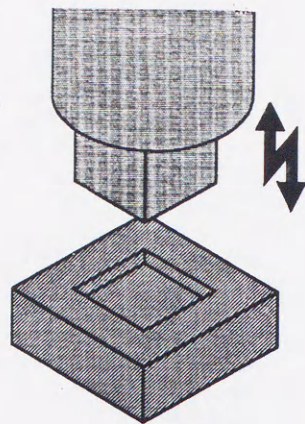
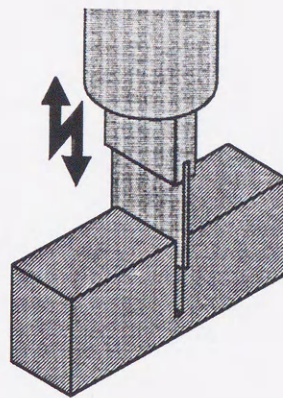


図 1.2 加工部の拡大図

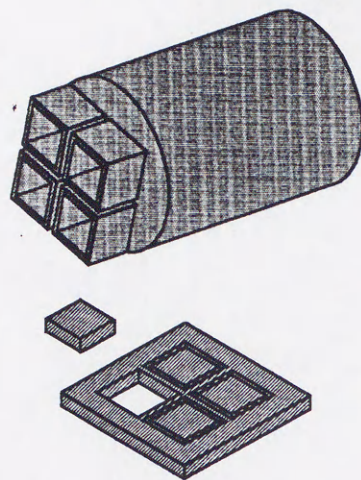




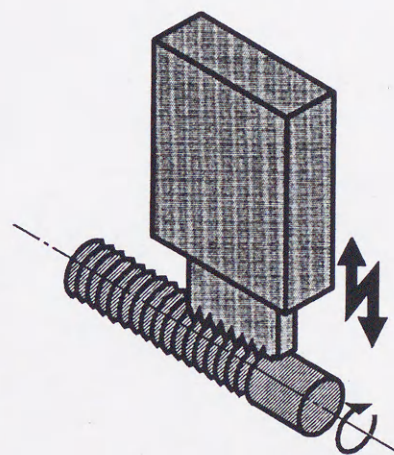
異形穴あけ加工



切断加工



切り出し加工



ねじ切り加工

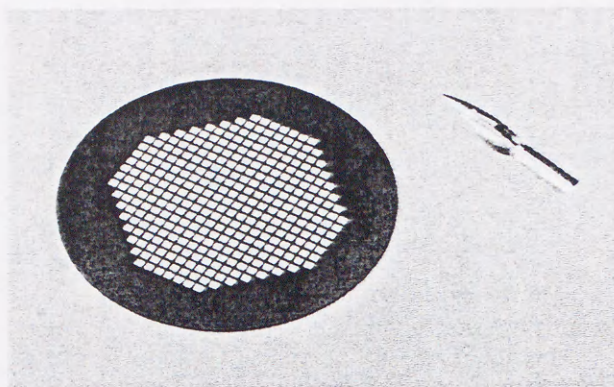
図 1.3 超音波加工の種類

に形状が転写される。

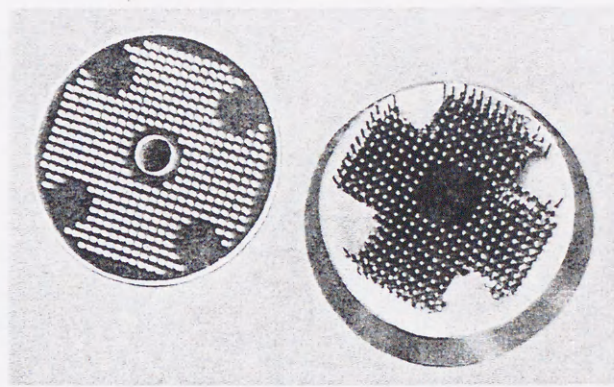
この加工法の特長として次のことがあげられる。

- ①高硬度材料の加工が可能である。
- ②角孔などの軸対称でない形状の孔を容易にあけることができる。
- ③微細な砥粒による破碎加工のため工作物表面の加工ひずみが小さい。
- ④加工表面は砥粒加工特有の梨地面が得られ、加工表面粗さは使用した砥粒径にほぼ比例する。
- ⑤加工機の構造上、作業中の危険が少ない。
- ⑥工具の回転や工作物と工具の間に大きな相対運動を必要としないため図 1.3 に見られるような種々の精密加工に応用可能である。

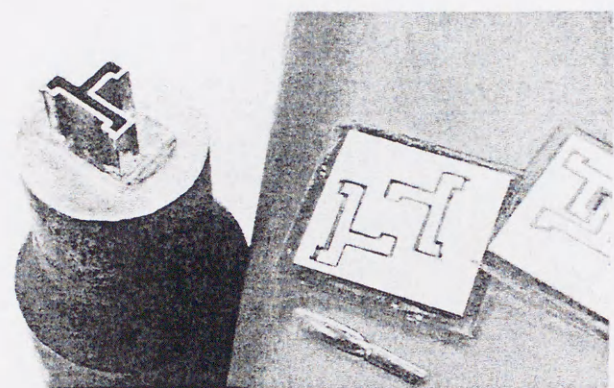




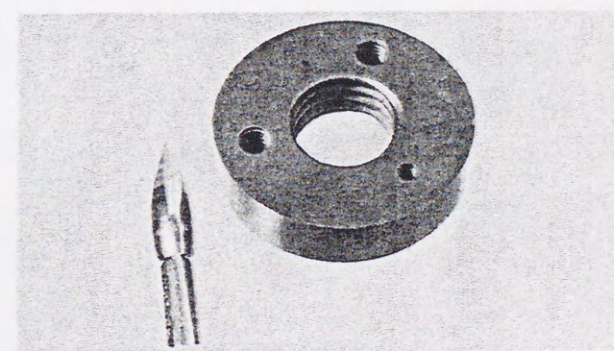
グラファイト角孔加工



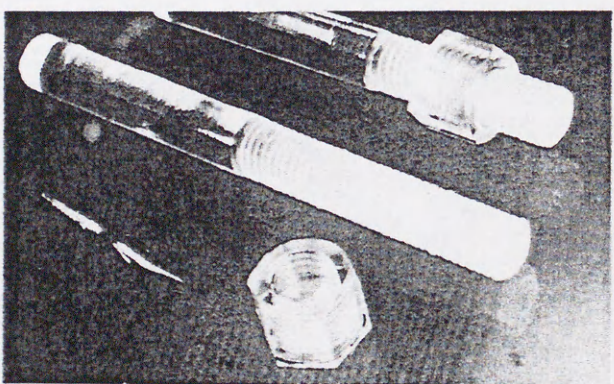
パイレックス皿加工



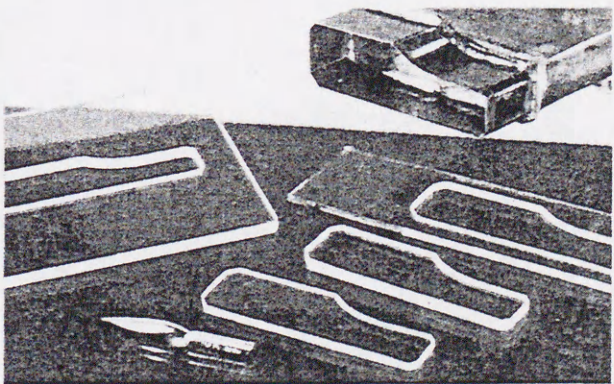
アルミナ基盤打抜加工



窒化ケイ素めねじ加工



石英ガラスのボルト・ナット加工



石英板打抜加工

図 1.4 超音波加工の一例



図 1.4 に、種々の工作物に対して超音波加工を施した例を示す。対象となる工作物は主にガラス、フェライト、石英、シリコン等の半導体素材、チタン酸バリウム等の圧電体材料、アルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、窒化ケイ素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )、炭化ケイ素( $\text{SiC}$ )、サイアロン( $\text{Si-Al-O-N}$ )、ジルコニア( $\text{ZrO}_2$ )などの硬脆材料である。このような材料に対して、図のような微細な孔や溝加工、形状創成加工などが容易に可能となる。

その反面、以下のような短所も存在する。

- ①工具磨耗があり、加工形状精度および仕上面粗さに影響を及ぼすので定期的に工具を交換する必要がある。
- ②止まり孔加工の場合、孔底面の形状が凸状になる。したがって底部を平坦に仕上げる場合、加工中に工具を周期的に再研削する必要がある。
- ③振動系の制約からホーンの直径をあまり大きくできない。(ホーン材料中を伝播する音波の  $1/4$  波長が限度とされている)
- ④遊離砥粒を使用するため、作業環境が悪くなる。

しかし超音波加工でなければできない加工も数多く存在し、これらの欠点を如何に克服するかが、適用範囲をさらに広げる上で重要なことである。

## 1.2 本研究の背景

現在、超音波加工は前述したように工作物が硬脆材料であれば導電性の有無にかかわらず適用することができるため、次に示すように多方面で使用されている。すなわち半導体材料としてのシリコンやガリウムヒ素等のウエハ切断およびダイシング、線引きディスプレイ用ダイヤモンドへの孔あけ、装飾用宝石としてのルビー、サファイヤ等の孔あけおよび切断、機械部品としての各種構造用セラミックスへの打ち抜き、孔あけそしてねじ切りなどである。

これらの加工で問題となるのは大きく分けて、加工能率と加工形状改善の二つである。これまで多くの研究がなされてきており、一例としては前者の加工能率の改善を目的とし、その加工メカニズムを解明する研究が行われた。大西ら<sup>6) 7)</sup>は、工具の振動による工作物の衝突を振動学的に究明して、加工時に工作物に作用する力を明らかにしようと試みた。これは工具と工作物の接触時間、加工負荷、砥粒の食い込み量などを定性およ



び定量的に求めたものである。それによれば加工速度が砥粒径や工作物により異なるのは、その静的破壊応力が異なるためであり、また加工圧力の最適値が存在するのは、砥粒の衝突速度が大きくなるにつれて工作物の破壊応力が減少するためであることを明らかにした<sup>8) 9)</sup>。

また加工速度や加工量の変化に関しては、砥粒の運動エネルギーから解析した実験も行われている。Barke ら<sup>10)</sup> はエネルギー保存則と運動量保存の法則から、加工に消費されるエネルギーを求め工具振幅と加工力との関係を明らかにした。それによると加工量は砥粒の質量と工具振幅の 2 乗に比例することを見いだした。これは砥粒と工作物が 1 回の衝撃で得られる値として求めたもので、実験値と理論値がよく一致することが知られている。しかし砥粒の破碎等があるため加工量は次第に低下し、実際の加工ではこれらを考慮する必要があるとしている。

一方、工具動力計で測定される平均衝撃力と加工速度の関係について、西村や島川ら<sup>11)</sup> が理論的および実験的解析を行っている。それによると平均衝撃力の増加とともに加工体積も増加することが示されている。また加工速度は平均衝撃力の 2.5 乗に比例すると結論づけている。

Show<sup>12)</sup> は砥粒を球形と仮定し、それが工具の振動により工作物に衝突し、ある深さまで圧入して表面が微細に破碎していくときの加工速度を算出している。その結果、加工速度は周波数と振幅の 3/4 乗、工作物表面に生じる平均応力の逆数の 3/4 乗、平均加工力の 3/4 乗および砥粒濃度の 1/4 乗に比例しているとした。実験値と理論値の間には大きなひらきがあり、その理由として砥粒粒径のばらつきを考慮していないこと、加工力増大による砥粒の破碎の影響が考慮されていないことなどが述べられている。

A.I.Markov<sup>13)</sup> や島川<sup>14)</sup> は加工速度の最大値は工具の複振幅と砥粒径の関係で決定され、図 1.5 で明らかなように砥粒径が工具の複振幅と同程度のときであるとしている。加工速度は砥粒径とともに増加すると考えがちであるが、超音波加工においてはある値を越えると逆に低下することを示している。

以上のように加工能率の向上に関連し、加工メカニズムの解明も含め、多くの研究がなされた。その結果、加工条件の設定に有用な指針が与えられた。

これに対し、加工形状精度や仕上面粗さに関する研究も行われている。例えば、G.Pahlitzsch<sup>15)</sup> は、加工形状精度をよくするためには、工具と工作物の間に介在する遊



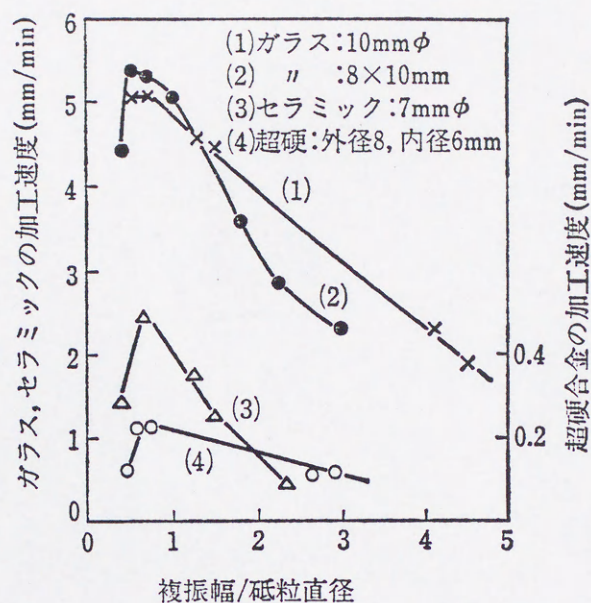


図 1.5 複振幅／砥粒直径

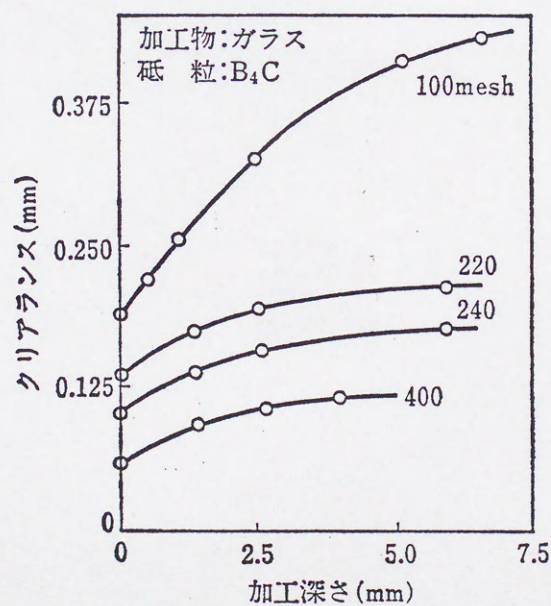


図 1.6 加工深さとクリアランス

離砥粒の粒径を小さくする必要があることを実験的に示している (図 1.6)。

また, E.A.Neppiras<sup>9)</sup>が加工に使用したスラリ中の砥粒径と仕上面粗さの関係につい



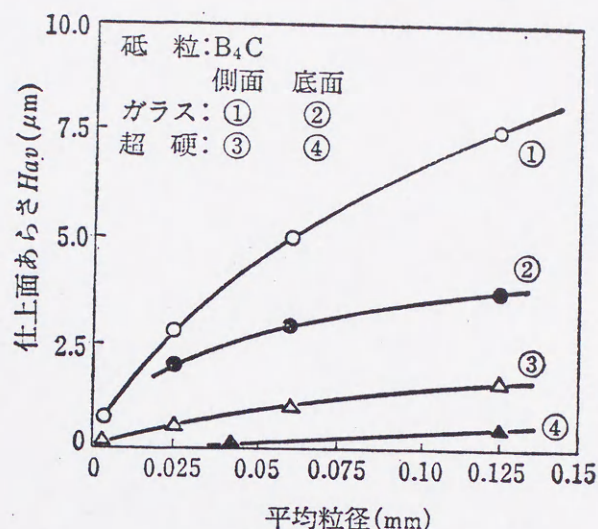


図 1.7 砥粒直径と仕上面粗さ

て詳細に調べている．その結果，加工孔の部位による仕上面粗さの変化，つまり底面より側面の方が図 1.7 に示すようによくなるとしている．その理由として，底面の粗さは砥粒の衝撃による微細な破碎で得られるのに対して，側面の粗さは砥粒の通過による引っかかり作用で得られるためであるとしている．

一般に加工形状精度は，工具と工作物間の隙間すなわち加工クリアランスによって決定される．通常，加工孔の寸法は，工具のそれよりも砥粒の平均直径の 2 個分程度大きくなると考えられる．しかし止まり孔加工の場合は，単に使用している砥粒径によるクリアランスの問題だけではなく，底面に発生する突起が形状精度を悪化させる新たな要因となる．実際の加工現場では，この突起の生成を押さえるために加工を中断し，工具を引き上げて砥粒の更新を促進させたり，あるいは工具修正を行ったりしているのが現状である．このように止まり孔加工における突起の生成が加工精度に重大な問題を引き起こすにも関わらず，その生成メカニズムに関してはあまり研究は行われていない．またこの突起生成現象は，超音波加工に特有な問題でもあり，非常に興味深い内容である．本論文ではこの止まり孔の加工に限定し，その孔底面にできる突起の生成メカニズムについて明らかにする．

またこの加工底面に突起が形成されると加工能率が低下する．しかしそのまま加工を



継続すると再び加工能率が向上する．このような加工能率の変動は，突起の生成過程と密接に関連しているものと考えられる．なぜこのように加工能率が変動するのかについても，突起の生成と関連付けて明らかにする．

ところで，超音波振動子を液体中に浸漬した場合，振動子先端近傍にはキャビテーションが発生することはよく知られている．キャビテーションの発生はエロージョンの発生を伴うため，高速流体機器の関連分野ではその解明，対策の研究が進んでいる．超音波加工においてもキャビテーションによるエロージョンが発生し，それが加工現象に重大な影響を及ぼしているものと考えられる．1.1 節でも述べたようにキャビテーションによる除去機構の解明も行われている．例えば，西村と島川ら<sup>11)</sup>は，キャビテーションのエロージョン作用で工作物が加工される割合を調べ，全体の加工量の数%にすぎないことを実験により確かめている．このように超音波振動に伴うキャビテーションによるエロージョンの，全加工量に対する影響は非常に小さい．しかしエロージョンという直接的な加工量への影響は少ないとしても，キャビテーションの発生に伴いスラリの循環，更新に影響が出て，間接的に加工量に影響を及ぼしていることは十分に予想される．

L.D.Rozenberg<sup>16)</sup>らは工具表面にキャビテーションが発生すると砥粒密度に影響を与えるものと考え，その砥粒の挙動を観察している．その結果，砥粒の密度分布が場所により異なることを捉えている．しかし工具径や工具と工作物間の距離でその分布領域がどのように変化するかについては詳細に報告されてはいない．一方，Rostovtsev<sup>17)</sup>は加工部分をチャンバーに入れ，大気圧以上の環境下にするによりキャビテーションの発生が抑えられると考え，実際に加工速度の増加が認められることを示している．しかし加工孔に発生する突起形成との関係については触れていない．このようにキャビテーションの発生は工具と工作物間に存在する砥粒の密度，粒度分布などを変化させ，加工形状，特に止まり孔加工における孔底面の形状精度に大きな影響を及ぼすと考えられる．

本論文では止まり孔の底面の突起生成に関して，このキャビテーションの形態がどのように影響を及ぼすかについて解明することにある．しかし，このような止まり孔底面の突起生成とキャビテーションの関係を結びつけて検討した研究事例は少ない．本論文ではこの点についても解明することを主眼としている．



本論文の目的をまとめると次のようになる。

- ①加工孔底面の突起生成メカニズムの解明。
- ②止まり孔加工時における加工の停滞現象の解明と対策。

以上の問題が解決されると、超音波加工による止まり孔加工時の形状精度向上につながるとともに、広くこの加工法の発展が期待できると考えられる。

### 1.3 本研究の工学および工業的意義

セラミックスなどの硬脆材料への孔あけにはダイヤモンドチップを用いたドリル加工、固定砥粒を用いた研削加工等があるが、いずれも工具に回転運動を必要とするため円形断面以外の形状加工は困難である。そこで現在、複雑多岐にわたる種々の部品形状孔あけには超音波加工が用いられている。

この加工法の対象となる工作物は主にガラス、フェライト、石英、シリコン等の半導体素材、チタン酸バリウム等の圧電体材料、アルミナそして窒化珪素、炭化珪素、サイアロン、ジルコニアなどの硬脆材料である。これらの材料は導電性があれば型彫り放電加工も可能であるが、このような性質を有するものはごく少数に限られる。これらセラミックス材料は金属材料にはみられない優れた以下のような特徴があげられる。

- 1) 耐磨耗性
- 2) 耐熱性
- 3) 耐食性

したがって、現在これらの定性的機能を利用して、従来からある金属材料から構成される機械部品をセラミックス材料に代替えしたいという需要がある。21世紀に向けてこれからの省エネルギー、環境問題等の観点からも高精度機器に使用される機械部品の多くが耐磨耗性、耐熱性そして耐食性に優れたセラミックス材料に置き替わることはまちがいない。

なかでも炭化珪素 (SiC) は耐熱性、耐食性および熱伝導性が大きく、しかも熱膨張が小さく熱衝撃に強い特徴を持つため機械部品としてベアリング、電気・電子機能材料



としてバイリスタ、熱的機能材料として抵抗発熱体など多方面で使用されている。そこで求められている形状は非常に幅が広く多岐に渡っているため複雑な形状のものが多く、かつ電気的および磁氣的性質にも影響されない加工方法が必要不可欠である。

これらの要求を満足する加工方法として超音波加工があげられる。この加工方法は工具の回転や工具と工作物の相対運動を基本的に必要としないことから円形断面以外の複雑な異形状孔あけ加工、溝切り加工、切断加工および彫刻などの幅広い加工が可能である。また工具の振動により工作物表面に微細な破砕を生じさせて加工を行うのでセラミックスのような硬脆材料の加工を最も得意とする。加工表面は遊離砥粒加工特有の滑らかな梨地面となり、その表面粗さは部位により多少の違いがあるものの加工に用いた砥粒の粒径にほぼ比例する特徴を持っている。

この加工の問題点は共振系すなわち振動子、ホーン、工具といった一連の接続から制約を受け、一度に加工できる面積が限られてしまうことと、加工中の砥粒径分布や運動、工具と工作物間のクリアランス、加工速度の推移、およびキャビテーションが加工に及ぼす影響等がまだ完全に解明されていないということである。

加工孔にキャビテーションが発生すると砥粒の侵入を抑制し、突起生成の原因となる。それにより加工孔底面が平坦にならず、寸法精度の良い良好な仕上げ面が得られない。そのため工具を再研磨したり交換するなどして再び加工面を仕上げる二次加工が必要不可欠となっている。

これは原理的に加工中の工作物表面に生じている微細な破砕を実際に測定することが困難なためである。またそれとともに加工に関与するパラメータが多く存在して、それらが複雑に影響を及ぼしあうため加工メカニズムの定量的な解析を遅らせている。そのため自動化のための無人化対策がとりにくく、部品加工の量産化、低価格化が遅れているのが現状である。

したがって、本研究により加工孔に発生する突起の生成メカニズムを解明し、その突起高さを抑制する加工法を確立した。それにより二次加工のための無駄な加工時間や労力をできるだけ削減することが可能となる。そして多方面で用いられている硬脆材料への超音波加工に応用されれば大幅な部品の製造に関わるコストの削減が期待できる。



## 1.4 本論文の構成と概要

本論文は全部で 6 章からなる。

第 1 章では超音波加工の原理を示し、その用途および加工例について述べる。次にその特徴と問題点、これまでの研究成果を列挙し、本研究の目的と工学および工業的意義について述べる。

第 2 章では、本実験で使用する超音波加工機の構成およびホーン的设计指針について示す。超音波加工機のホーンは振動子内で発生した振動を拡大して工具へ伝達するものである。そのため内部損失のできるだけ少ない形状のものを設計する必要がある。そこでホーンの形状について検討し、具体的な寸法決定に至るまでの計算手順を示す。また工具、砥粒および工作物の特性を示す。

第 3 章では超音波型彫り加工における加工の停滞現象について述べている。これは発振出力一定のもとで加工深さが時間とともに比例せず低下していく現象である。この現象は工具の断面積が大きくなるほど顕著に現れる。本章では、加工孔の中央に発生する突起が工作物に接触して突き当たりを起こし加工速度が停滞する現象を明らかにする。

第 4 章は超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動について示している。そのために工具端面と工作物間に存在する砥粒の粒径分布を調べるとともに CCD カメラでその挙動を観察する。そして突起が発生、成長、衰退そして再成長する過程を明らかにする。

第 5 章では超音波型彫り加工で発生するキャビテーションと工具・工作物間の砥粒の挙動について述べている。加工孔底部の砥粒挙動を直接観察し、工具・工作物間で発生するキャビテーションによる気泡群の影響を明らかにする。そして加工孔底部中心付近に突起が形成され、加工形状が劣化する原因を明らかにする。さらに工具断面形状、加工液の性質がキャビテーションの発生状態に与える影響について検討するとともに、キャビテーションの影響を小さくする方法についても明らかにする。

第 6 章は本研究で得られた結果を総括し、結論とした。



## 第 1 章の参考文献

- (1) E.A.Neppiras and R.D.Ffosket: Ultraschall-Materialbearbeitung, Philips tech. Rundschau, 19,2(1957)37.
- (2) M.C.Show: Das Schleifen mit Ultraschall, Microtechnic, 10,6(1956)265.
- (3) I.V.Metelkin and V.V.Metelkin: Physical principles of ultrasonic machining, Mashinostroitei, No.10(1958)9.
- (4) L.Balamuth: Method and Means for Removing Material from Slid Body, US Patent No.2580716, dated Jan.11(1951).
- (5) I.S.Vainshtok: Some aspects of the physical basis of ultrasonic machining, Stanki i Instr.No.4(1958)13.
- (6) 大平正広: 超音波加工の力学的研究, 精密機械, 27,3(1961)168.
- (7) 大平正広, 影山陽道, 阿久津修: 超音波加工の負荷と加工速度に関する実験的研究 (接触角, 加工負荷, 砥粒の食い込み量), 精密機械, 27,7(1961)480.
- (8) G.Pahlitzsch: Werkstattetechnik, 50,1(1960)592.
- (9) E.A.Neppiras: Metal working production, Aug.31(1956)1377.
- (10) V.N.Barke: A study of the oscillatory system of the vibrator in an ultrasonic machine, Dissertation, Moscow Machine Tool Institute (1959).
- (11) G.Nishimura and S.Shimakawa: Ultrasonic Mechanical Machining (Part IV) Mainly in Relation to the Analysis of Machining Function and Method of Increasing Machining Efficiency, J.Faculty of Engg., Univ. of Tokyo, 25,4(1958) 213.
- (12) M.C.Show: Ultrasonic Grinding, Microtecnic, 10,6(1956)257.
- (13) A.I.Markov: Ultrasonic machining of intractable materials, Iliffe Books London (1966).
- (14) 島川正憲: 超音波工学, 理論と実際, 工業調査会 (1977)203.
- (15) G.Pahlitzsch: Werkstattstechnik, 50,1(1960)592.
- (16) L.D.Rozenberg and V.F.Kazantsev: A study of the mechanism of ultrasonic machining by high-speed cinematography, Stanki i Instr.No.5(1959)20.



- (17) N.M.Rostovtsev: Experience with ultrasonic machining of materials at high hydrostatic pressures, Use of Ultrasonics in the Examination of Materials, No.XII, Izd.MOPI(1960)53.



## 第2章 超音波加工機の構成

### 2.1 緒 言

超音波加工機は発振器、磁歪振動子、振動拡大用コーンとホーンおよび工具から成る振動系で構成されている。それに加工圧調整装置やスラリー供給装置が付属する。加工機的能力を十分に引き出すためニッケル磁歪振動子の振幅を拡大して工具に伝えるホーンを設計、製作した。それには材料内の応力損失をできるだけ少なくするためエキスポネンシャル型とステップ型を組み合わせる構造とした。また加工中の工具振幅を測定することは非常に困難であるため、あらかじめ加工力と工具の複振幅の関係を実験により調べた。

また加工力を加える方法としてステッピングモータを用いた送り機構を使用した。これにより任意の加工力を容易に設定することが可能となり、同時に加工中工具を一定間隔で引き上げることも可能とした。

#### 2.1.1 超音波加工機

図 2.1 に超音波加工機の全体図を示す。加工機本体には放電加工機（三菱電機（株）製）のものを流用し、ヘッド部分には振動子およびステッピングモータによる微小送り装置を取り付けた。超音波振動を発生させる発振器は、日本電子工業（株）製 UM-1000EA を用いた。その加工機的主要仕様を表 2.1 に示す。

これは最大出力 1kW、共振周波数 16kHz で、工具磨耗等による共振周波数変動に対する周波数の自動調整機能がある、振動子はニッケル磁歪振動子で、直流磁界と高周波磁界とを重ねて加え、磁歪現象を起こすことによって高周波振動を発生させる。磁歪振動子は 100kHz 以下、特に 30kHz 以下の領域で用いられるもので、電気的入力インピーダンスが低く、しかもコイルの巻き数によってインピーダンスを変えられる利点をもっている。また共振特性値（Q 値）がさほど高くない、すなわち周波数に対する共振がそれほど尖鋭ではないために、共振周波数変動に対して安定であり、非常に扱いやすくなっている。

工具の送り運動は、モータドライバにコンピュータからのパルス入力を行うことで



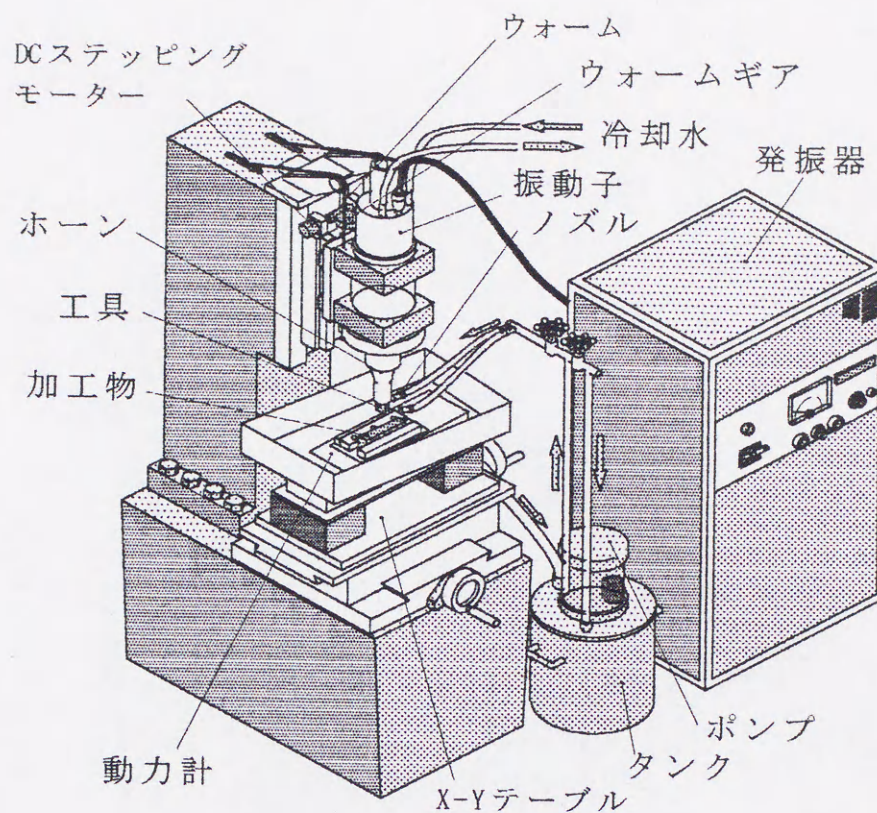


図 2.1 超音波加工機

表 2.1 超音波加工装置の仕様

加工機	
振動子	ニッケル磁歪・水冷式
共振周波数	16kHz
最大入力	1kWmax
発振器	
日本電子工業(株)製	UM-1000EA
発振周波数	16kHz
周波数調整	自動・手動両用
出力	1kWmax

ステッピングモータを回転させ、ウォームおよびウォーム歯車を介してボールねじを駆動させることにより行った。ウォームを用いるため、大きな減速比が得られる。ウォーム歯車による減速比 40、ボールねじのリード 10mm、ステッピングモータのステップ



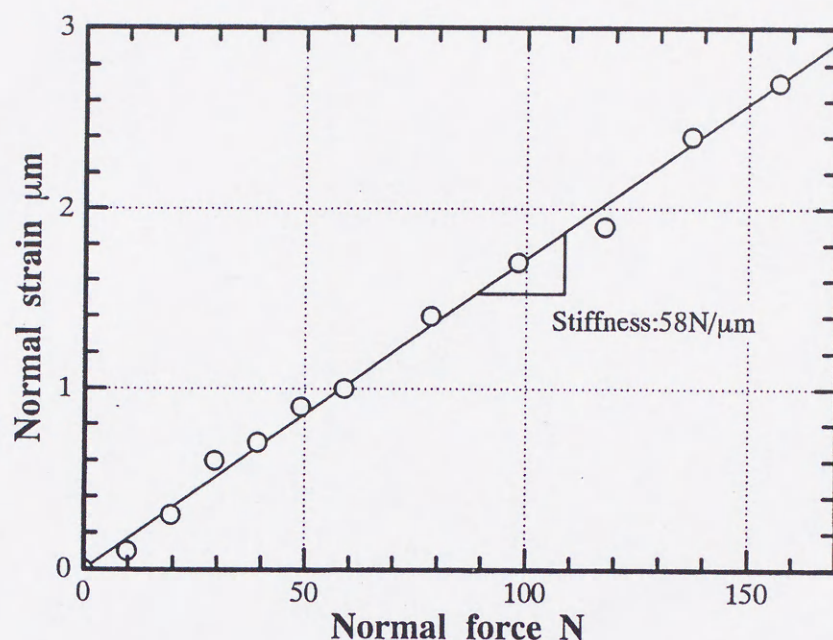


図 2.2 加工機の剛性

角  $0.9^\circ$  であり、分解能は  $0.26 \mu\text{m}/\text{step}$ 、最小送り速度は  $50 \mu\text{m}/\text{min}$  となっている。

加工力は加工テーブルに据え付けられた動力計を用いて計測し、ペンレコーダにより記録した。スラリの供給は、タンクに設置されたポンプによりノズルを通して加工部分にまで送られ、加工に用いられた後、回収されて再びタンク内へと戻るという循環経路で行われる。また工作物は、その固定のため、そして加工が進展して工具が貫通した時に、切り口周辺に欠けが発生することを防止する意味から、シェラックやボンドワックス等でガラス板等の下貼り材に接着したうえで加工した。

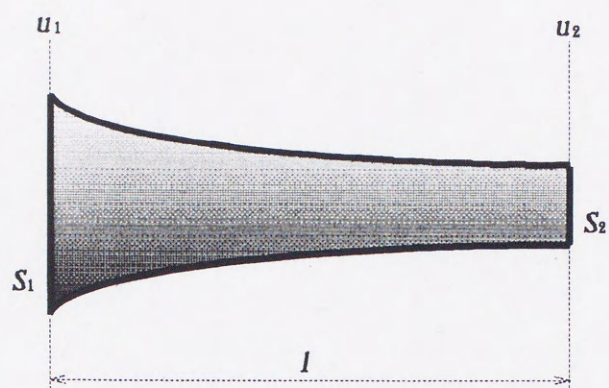
加工力による振動子基部の変位と、それから求めた剛性を図 2.2 に示す。その結果、試作した超音波加工機は  $58 \text{N}/\mu\text{m}$  と、ほぼ十分な剛性を持つことがわかった。

## 2.2 ホーンの種類および設計<sup>1)</sup>

### 2.2.1 ホーンの種類

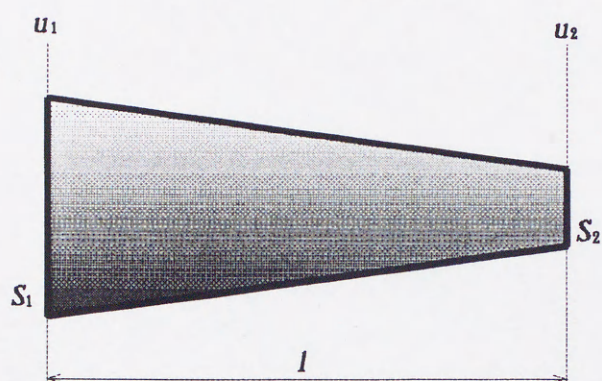
超音波加工の振動子系は、振動子、コーン、ホーンそして工具からなる。加工は振動子から発生した微小な超音波振動をコーンおよびホーンで増幅して工具に伝達するこ





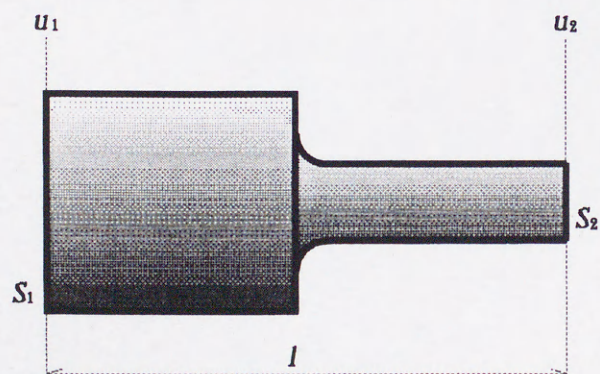
(a) エクスポネンシャル型

$$u_2/u_1 = \sqrt{S_1/S_2} = M$$



(b) コニカル型

$$u_2/u_1 = \frac{1}{\frac{\cos \alpha l}{K} \{1 + (K-1) \tan \alpha l / \alpha l\}} = M$$



(c) ステップ型

$$u_2/u_1 \approx S_1/S_2 = M$$

$u_1$ : ホーン入力端振動振幅

$u_2$ : ホーン出力端振動振幅

$S_1$ : ホーン入力端面積

$S_2$ : ホーン出力端面積

$M$ : 振幅拡大率

$\omega$ :  $2\pi f$  (角周波数)

$K = S_1/S_2$

$\alpha = \sqrt{\omega/c}$  (波長定数)

図 2.3 ホーンの種類とその形状



とにより行われる。このホーンは加工速度や加工精度の面で重要な要素となる。従ってホーンの形状は振動子の共振周波数、工具の形状、およびその材質の物性等を考慮して決定しなければならない。ホーンは振動子、コーン、そして工具と縦列に接続され、それらの要素が一体となって縦振動の共振系をなすため、それぞれが共振周波数で半波長共振体であるように設計する。通常用いられるホーンの基本的な形状としては、図 2.3 に示すように、断面が指数関数的に先細状に変化する(a)エクスポネンシャル (Exponential) 型、工具直径が一次関数的に変化をする(b)コニカル (Conical) 型、断面が一様で太さの異なる棒材を結合した形状で製作の容易な(c)ステップ (Step) 型等がある。ホーン両端面の面積比が同一であれば、振幅拡大率はステップ型が最大で、以下エクスポネンシャル型、コニカル型の順になる。そのため、ホーン先端の振幅を大きくとろうとすればステップ型が有利であり、実際広く使用される。しかしながら内部で発生する振動応力が、急激な断面積の変化が起こるステップ部分で特に大きくなりそのため内部損失も大となるという欠点がある。

そこで実際には、目的に応じてこれらを変形したものや、組み合わせたものを用いることが多い。材質は、工具との銀ロウ付けやハンダ付けによる接合の都合から、超音波加工機用ホーンは一般的に軟鋼製である。コーン端との接合には、接合部分が振動の節となることが多いため、着脱の容易なねじ結合が用いられることが普通である。工具材料としては、軟鋼、ステンレス鋼、ばね鋼などが用いられるが、通常はこれも軟鋼製の場合が多い。

ホーン端への接合方法は大型の工具を使用する場合や加工時の振幅と発振器の出力が大きい場合には、銀ロウ付けが行われる。いっぽう工具が小さく振幅や出力も小さければ銀ロウ付けに比較して接合力はやや劣るが工具の交換が比較的容易なハンダ付けが使用される。さらにごく小さな工具や振幅の場合にはボルト締め、ねじ結合およびはさみ込みといった方法が用いられる。

本研究においては、ステップ型のホーンのステップ部分をエクスポネンシャル型ホーンでつなぐことで、高い振幅拡大率と少ない内部損失をある程度両立できる形状のホーンを設計、製作したものを使用した。

図 2.4 にホーンの概略図を示し、以下のように各部の寸法を設計した。



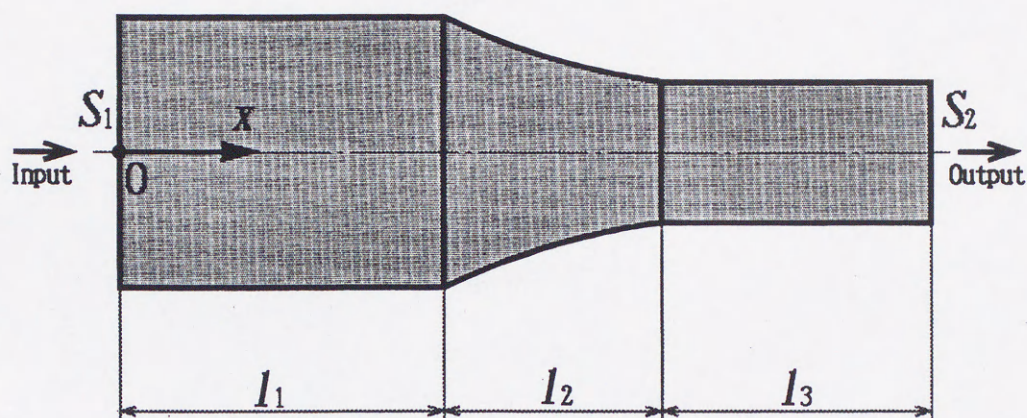


図 2.4 ホーンの概略図

### 2.2.2 ホーン的设计

$l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  をホーンの 1 段目, エクスポネンシャル部, 2 段目のそれぞれの長さとしたとき, エクスポネンシャル部の形状は次のように表される.

$$S_2 = S_1 \exp(\gamma l_2) \quad (2.1)$$

この場合の共振条件は次のようになる.

$$\frac{\gamma}{2\alpha} < 1 \text{ のとき } \tan \alpha l_3 = \frac{\cos \phi}{\tan \alpha' l_2} + \sin \phi \quad (2.2)$$

$$\frac{\gamma}{2\alpha} > 1 \text{ のとき } \tan \alpha l_3 = \frac{\sinh \xi}{\tanh \alpha' l_2} + \cosh \xi \quad (2.3)$$



ただし

$$\frac{\gamma}{2\alpha} < 1 \text{ のとき } \sin \phi = \frac{\gamma}{2\alpha}, \quad \alpha' = \alpha \cos \phi$$

$$\frac{\gamma}{2\alpha} > 1 \text{ のとき } \cosh \zeta = \frac{\gamma}{2\alpha}, \quad \alpha' = \alpha \sinh \zeta$$

である.

計算の利便のため,  $\frac{\gamma}{2\alpha} = 1$  とする. このとき  $S_1$  端面の振動速度が  $\dot{v}_1$  とすると応力

$\sigma$  は次の通りとなる.

入力側直線部:

$$\left| \frac{\sigma}{j \rho c \dot{v}_1} \right| = \sin \alpha x \quad (2.4)$$

エクスポネンシャル部:

$$\left| \frac{\sigma}{j \rho c \dot{v}_1} \right| = \{1 + \alpha(x - l_1)\} \exp\{\alpha(x - l_1)\} \quad (2.5)$$

出力側直線部:

$$\left| \frac{\sigma}{j \rho c \dot{v}_1} \right| = \alpha l_2 \frac{\exp(\alpha l_2)}{\cos \alpha l_3} \sin \alpha(l_1 + l_2 + l_3 - x) \quad (2.6)$$

振動速度の分布 (周波数一定ならば振幅の分布と同じ) は,



入力側直線部：

$$\left| \frac{\dot{v}}{\dot{v}_1} \right| = \cos \alpha x \quad (2.7)$$

エクスポネンシャル部：

$$\left| \frac{\dot{v}}{\dot{v}_1} \right| = \alpha(x - l_1) \exp\{\alpha(x - l_1)\} \quad (2.8)$$

出力側直線部：

$$\left| \frac{\dot{v}}{\dot{v}_1} \right| = \alpha l_2 \frac{\exp(\alpha l_2)}{\cos \alpha l_3} \cos \alpha(l_1 + l_2 + l_3 - x) \quad (2.9)$$

となる。

振幅拡大率Mは次式のように求められる。

$$\frac{\gamma}{2\alpha} < 1 \text{ のとき} \quad M = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin 2\alpha l_3 \sin \phi}} \quad (2.10)$$

$$\frac{\gamma}{2\alpha} > 1 \text{ のとき} \quad M = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin 2\alpha l_3 \cosh \xi}} \quad (2.11)$$

入力側直線部とエクスポネンシャル部との接続部で、エクスポネンシャル曲線に引いた接線が軸線となす傾斜角を  $30^\circ$  とすれば、入力端の直径  $D_1$  から  $l_2$  が求められる。

$$\alpha l_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha D_1 \log_e \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad (2.12)$$

ホーン先端に工具を付ける場合には、工具の機械インピーダンス相当分の出力側直線部を切り詰めることになる。この長さ  $\Delta l$  は次式のようになる。



$$\Delta l = \frac{m_t}{S_2 \rho} \quad (2.13)$$

このとき  $\alpha \Delta l < 0.25$  とする.

### 2.2.3 ホーン寸法の計算

上記の理論式に基づき以下のような条件でホーン的设计を行った.

大端面直径 :  $D_1 = 60\text{mm}$

小端面直径 :  $D_2 = 20\text{mm}$

振動子共振周波数 :  $f = 16\text{kHz}$

ホーン, 工具材質 : 軟鋼 ( $\rho = 7.8\text{g/cm}^3$ ,  $c = 5.2 \times 10^5\text{cm/s}$ )

波長定数 :  $\alpha = \alpha_t = \omega / c \text{ (cm}^{-1}\text{)}$

$$= 2\pi f / c$$

$$= 0.1933\text{cm}^{-1}$$

超音波波長 :  $\lambda = \lambda_t = c / f$

$$= 32.5\text{cm}$$

入力側直線部長さ :  $l_1 \equiv \lambda / 4$

$$= 8.125\text{cm}$$

$$\doteq 81.3\text{mm}$$

工具長さ :  $l_t = 20\text{mm}$  (直径 8mm)

工具質量 :  $m = \rho \times \pi / 4 \times 0.8^2 \times 2$

$$= 7.841\text{g}$$

等価質量 :

$$m_t = \frac{m \tan(\alpha l_t)}{\alpha l_t}$$

$$= 8.257\text{g}$$

$\alpha \Delta l < 0.25$  (条件) より, 小端面積  $S_2$  の制限を求めると,

$$S_2 > \frac{\omega m_t}{0.25 \rho c} = 0.819\text{cm}^2$$



小端径  $D_2 = 20\text{mm}$  とするから

$$S_2 = 3.14\text{cm}^2 > 0.819\text{cm}^2$$

よって  $D_2 = 20\text{mm}$  で充分である.

次に

$$\frac{S_1}{S_2} = 9, \quad \frac{D_1}{D_2} = 3$$

$$\alpha D_1 = 0.1933 \times 6.0 = 1.1598$$

さきに示した条件式より

振幅拡大率

$$M = 7.0$$

$$\alpha l_2 = 1.10 \quad \therefore l_2 = 56.9\text{mm}$$

$$\alpha l_3' = 1.08 \quad \therefore l_3' = 55.9\text{mm}$$

また

$$\alpha = \frac{2}{l_2} \log_e \frac{D_1}{D_2} = -0.03862$$

これより  $l_2$  の長さ部分のエクスポネンシャル形状が決定する.

$$\begin{aligned} D_x &= D_1 \exp\left(\frac{\gamma x}{2}\right) \\ &= 60 \times \exp(-0.01931x) \end{aligned}$$

工具取り付けのために切り詰める寸法は

$$\Delta l = \frac{m_i}{S_2 \rho} = 3.4\text{mm}$$



$$\Delta l = \frac{m_t}{S_2 \rho} = 3.4 \text{ mm}$$

$$l_3 = l_3' - \Delta l = 52.5 \text{ mm}$$

これらの計算結果にしたがってホーン寸法を決定した。

### 2.3 工具と砥粒の特性

本研究では入手および製作が容易な軟鋼(S45C)工具を旋削加工して用い、砥粒には工作物よりも硬度の大きい炭化ホウ素( $B_4C$ )を使用した。それらの特性値を表 2.2, 表 2.3<sup>2)</sup>に示し、表 2.4 には砥粒の材質の違いによるビッカース硬度<sup>2)</sup>の比較を示した。この表から分かるように炭化ケイ素(SiC)より硬度の大きい砥粒は炭化ホウ素( $B_4C$ )とダイヤモンドだけである。また表 2.5 に工作物として使用した炭化ケイ素(SiC)の特性値<sup>3)</sup>を表 2.6<sup>3)</sup>にはその用途を示した。

表 2.2 軟鋼製(S45C)工具の特性値<sup>2)</sup>

項目	S45C
かさ密度[kg/m <sup>3</sup> ]	7840
曲げ強度[Mpa]	—
ヤング率[Gpa]	210
ビッカース硬度[Gpa]	~2
破壊靱性KIC[MN/m <sup>3/2</sup> ]	210以上
熱膨張係数[×10 <sup>-6</sup> /K]	11
熱伝導率[W/mK]	44



表 2.3 炭化ホウ素(B<sub>4</sub>C) の特性値<sup>2)</sup>

項 目	B <sub>4</sub> C
曲げ強さ [MPa]	330
引張り強さ [MPa]	—
圧縮強さ [MPa]	2750
Young率 [Gpa]	360～400
Knoop硬度 [kg/mm <sup>2</sup> ]	2800

表 2.4 砥粒のビッカース硬度<sup>2)</sup>

材料	ビッカース硬度
焼 結 WC	1600～1800
焼 結 TiC	max 3200
溶 解 WC	1800～2000
アルミナ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	max 2300
炭化ケイ素 SiC	max 3500
炭化ホウ素 B <sub>4</sub> C	max 3700
ダイヤモンド	10060



表 2.5 炭化ケイ素(SiC)の特性値<sup>3)</sup>

高温・高強度SiC CERASIC-B			
機械的特性	かさ密度	g/cm <sup>2</sup>	3.15
	曲げ強さ	MPa(室温)	450
		MPa(熱間)	1450°C
			450
	ヤング率	GPa	420
	ポアソン比		0.18
	ビッカース硬度		2300
熱的性質	破壊靱性(K <sub>IC</sub> )	MPa・m <sup>1/2</sup>	3.5
	線膨張係数	× 10 <sup>-6</sup> /K	4.5
	熱伝導度	W/mK	170
	耐熱衝撃温度(ΔT)	°C	450
その他特性	電気抵抗率(室温)	Ω・cm	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup>
			高温強度,耐酸化性
	構造部材		耐摩耗性,高硬度・高剛性
	半導体用部材		耐摩耗性,硬度・剛性,耐薬品性,CVD可能
	電磁波用部材		電磁波吸収性,反射性,耐熱性
	耐食部材		耐熔融金属性,耐還元雰囲気,耐酸性
	導電性部材		放電加工可能

表 2.6 炭化ケイ素(SiC)の用途<sup>3)</sup>

用途例	
耐熱部材	ラジアントチューブ,炉芯管,ローラー
構造部材	メカニカルシール,軸受け,ポンプ部品
半導体用部材	ラッププレート,真空チャック,エアスライダー,精密ステージ
電磁波用部材	マイクロ波吸収体,SORミラー
耐食部材	保護管,ケミカルポンプ部材,炉芯管
導電性部材	スパークロッド,フレイムロッド,放電加工部材



## 2.4 結 言

最適なエクスポネンシャル型ホーンを設計，製作した．それにより発振器出力 300W のとき工具端で最大  $82\mu\text{m}$  の複振幅を得ることができた．またこの複振幅は加工力によって変化するため両者の関係を調べた．その結果，本研究で使用する砥粒は平均粒径  $50\mu\text{m}$  程度の  $\text{B}_4\text{C}$ , #280 であるため複振幅も同程度の値が得られる加工力 10N を最適加工力として主に採用した．加工孔深さ毎のメカニズムを解明するため，工具送り量を基本的に  $100\mu\text{m}$  ずつ増加させた加工を行った．それには電気マイクロメータの出力を監視してパーソナルコンピュータによる DC ステッピングモータを制御して行った．加工後の工具は毎回新しいものに取り替え，また別の位置で次の加工を繰り返した．

## 第 2 章の参考文献

- (1) 島川 正憲：超音波工学－理論と実際－，工業調査会，(1977),125.
- (2) セラミックス材料技術集成，産業技術センター，(1979).
- (3) 東芝セラミックスカタログ，” CERASIC”，常圧焼結 SiC，(1996).



## 第3章 超音波型彫り加工における加工の停滞現象について

### 3.1 緒言

超音波型彫り加工では，出力一定の下で，一般に加工時間と加工深さは比例しない。すなわち加工時間の増加と共に，単位時間当りの加工深さ（以下，加工速度と呼ぶ）が次第に減少するいわゆる加工の停滞現象が起きる。この現象は工具面積が大きいほど顕著に現れる。

これは，(1)加工深さの増加に伴って破碎した砥粒の更新がし難くなる，(2)工具と工作物間の摩擦力が増加し工具振幅が減少する，などの影響が相互作用を及ぼし合い発生するものとされている。<sup>1)2)</sup> しかしこれらの様子を直接観察することは非常に困難である。そのため，この現象が超音波型彫り加工において基本的でかつ重要な現象であるにも拘わらず，そのメカニズムについてあまり立ち入った議論や検討は行われていない。

そこで本研究では加工面および工具面の走査型電子顕微鏡による観察や砥粒の粒径分布の変化などから，この現象の原因とメカニズムを明らかにすることを試みた。

### 3.2 実験装置および実験条件

#### 3.2.1 超音波加工機

図3.1に本実験に用いた超音波加工機（最大出力1KW,共振周波数16KHz）の加工部分の概要を示す。超音波型彫り加工では，通常，重錘を用いて工具と工作物間の加工荷重を一定に保持する定圧加工方式が採られる。しかし本研究では，種々の工具径に対応して加工荷重を自由に設定できるよう，ボールねじとステッピングモータによる送り機構を用いて加工荷重を一定に保つ方式を採用した。加工荷重は，工作物の下に抵抗線ひずみゲージ式動力計を置いて検出し，記録することができるようにした。またスラリは，ポンプによりタンクから汲み上げ，写真のノズルから工具と工作物間に常に一定流量供給した。

#### 3.2.2 ホーンおよび工具

実験に用いたホーンの形状はステップ型とエクスポネンシャル型を組み合わせたものとした。これは高い振幅拡大率と少ない内部損失をある程度両立できるように設計した。



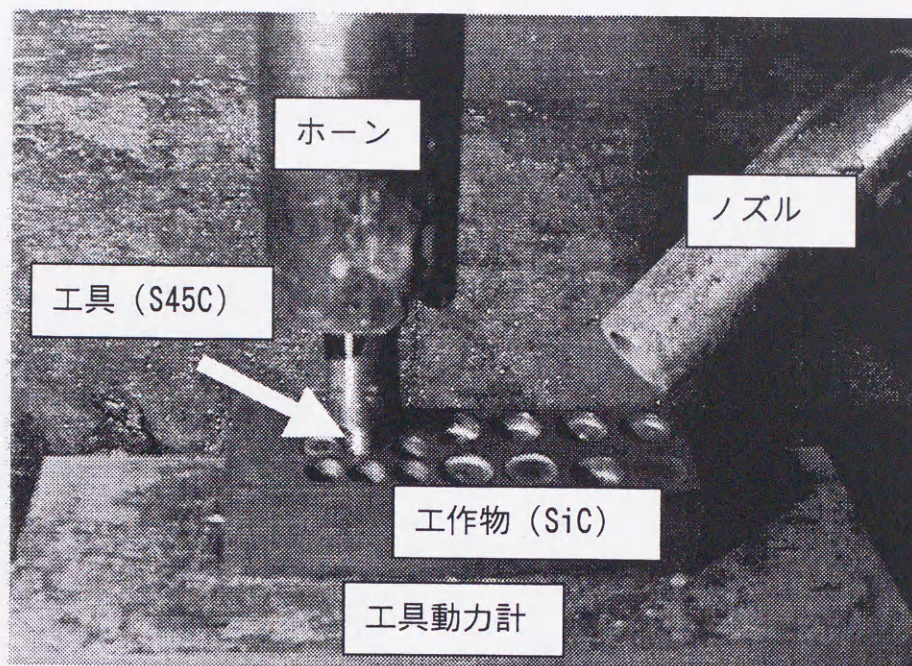


図 3.1 加工部分の概要

ものである。その形状を図3.2に示した。またホーン及び工具の接続には、比較的高い剛性が得られるハンダ付を用いた。

### 3.2.3 実験条件

表3.1に実験条件を示す。実験は、工具の直径に合わせて加工荷重を変え、加工圧を一定に保つ方法で行った。工具は旋削加工で直径を3mm, 4mmそして6mmにした軟鋼製 (S45C) の中実丸棒を用いた。そしてSiCの工作物 (東芝セラミックス製 CERASIC-B) を型彫り加工した。砥粒には $B_4C$ の#280を使用した。それを水に重量比で14%混合させてスラリーをつくり加工部分にポンプで毎分1.7l噴射した。加工力は直径3mm, 4mmそして6mmの工具のときそれぞれ5.6, 10そして23Nとした。それにより加工圧力は0.8MPa一定とした。

また実験は工具の送り量をダイヤルゲージで正確に読みとりながらそれぞれの工具に対して行った。つまり1つの加工孔の送り量  $100\mu\text{m}$  毎に工具1本を使用して孔あけ加工を行った。そして加工前後の工具長を工場顕微鏡で正確に読みとり累積工具磨耗量を計測した。またそれらの値と加工深さから加工中の工具と工作物間の距離すなわち加



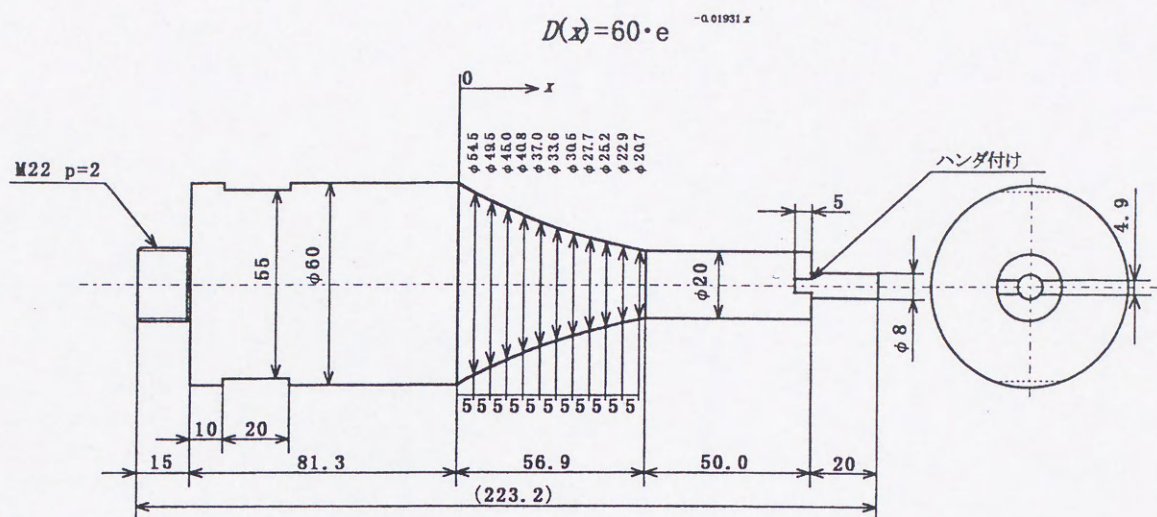


図 3.2 ホーン形状

表 3.1 実験条件

工具	軟鋼 (S45C) $\phi 4, \phi 6, \phi 8\text{mm}$
工作物	SiC (東芝セラミックス製 CERASIC-B)
スラリ	B <sub>4</sub> C (#280) 砥粒を水道水に 重量比で14%混合
加工力	10, 23, 40N
加工圧	0.8N/mm <sup>2</sup> 一定

### 3.3 加工速度に対する工具径の影響

エクリアランスを算出した。まず、加工時間に伴う加工深さの変化を、加工圧一定のもとで工具径をパラメータにして調べた。

図3.3にその結果を示す。図のように、いずれの工具径の場合にも、加工時間の増加と共に加工深さの増加が緩やかになり、加工速度が次第に低下するという結果が明らかに



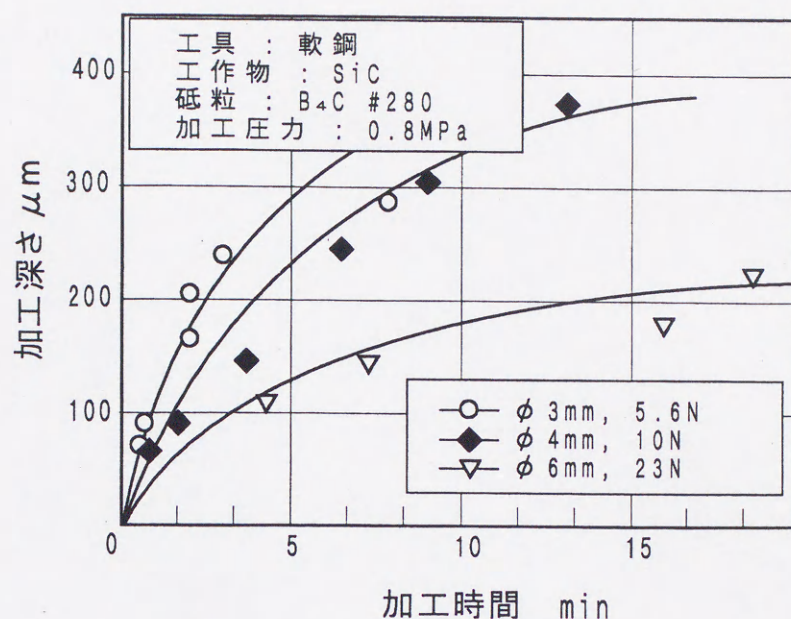


図3.3 加工時間と加工深さ

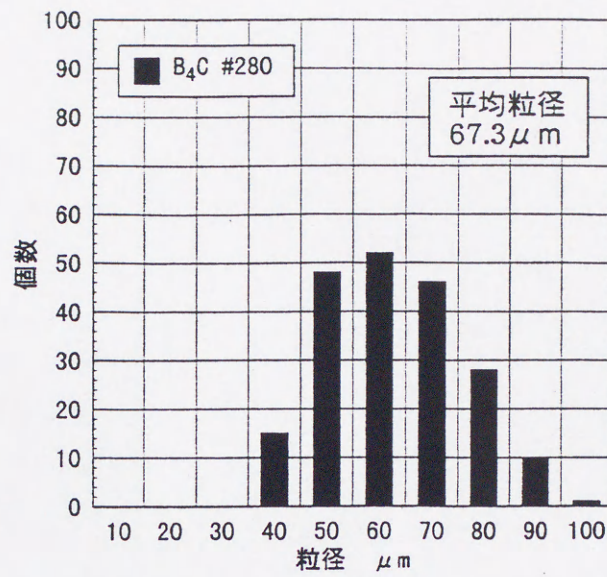
なった。この傾向は、工具径が大きくなるほど顕著に現れ、しかも同じ加工圧にもかかわらず、工具径が大きくなるほど加工速度が低くなった。いわゆる工具面積効果である。そして直径6mmの工具では、加工深さが200 $\mu$ m以上になるとほとんど加工が進行しなくなった。

この原因として、まずスラリ中の砥粒の破碎による劣化が考えられる。すなわち、工具面積が大きくなるほど加工点へのスラリの流入が困難になり、破碎劣化した砥粒の更新が行われ難くなる。また加工圧を一定にした場合、工具径が大きいほど加工荷重は大きくなる。一般に、発振器の出力を一定にした場合、加工荷重が増加すると振幅が減少する。したがって、工具径が大きくなるほど工具振幅が小さくなり、劣化した砥粒の更新がさらに行われ難くなることが原因と考えられる。

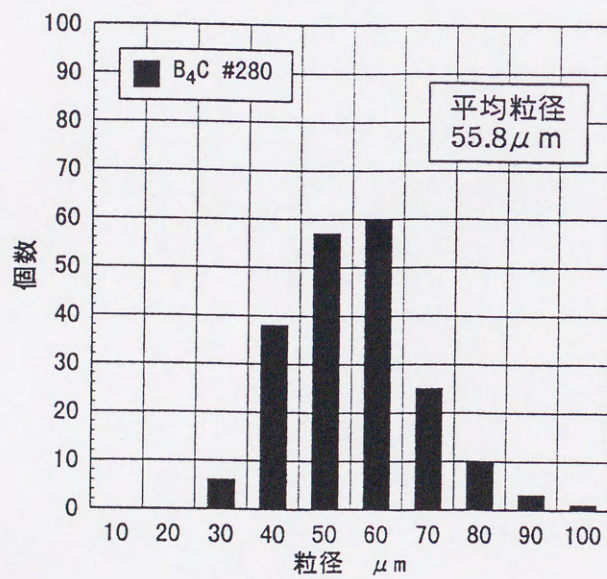
そこでこれらを確認するために、まず径の異なる工具を用いてそれぞれ10min間加工した後、加工を中断して加工孔の中心部付近から砥粒を採取し、それぞれの粒径分布を比較した。

図3.4にその結果を示す。図で(a)は加工前の粒径分布、(b)、(c)はそれぞれ直径4mm、

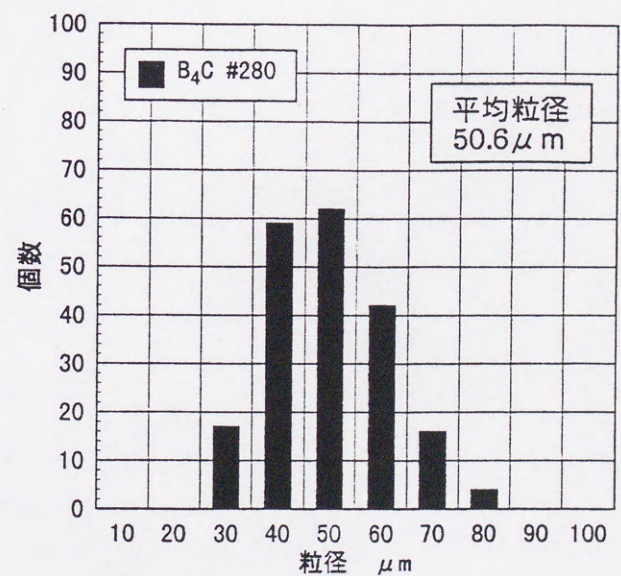




(a) 加工前



(b) φ4工具 (10min加工)



(c) φ6工具 (10min加工)

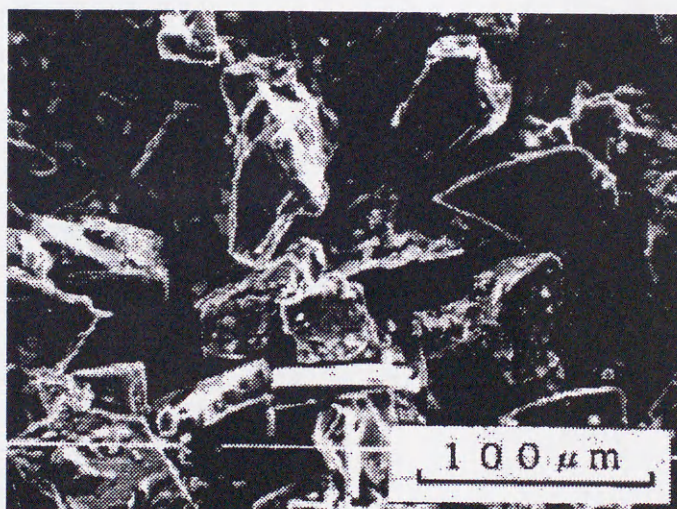
図3.4 砥粒径分布の比較

6mmの工具を使用した場合の粒径分布である。加工荷重はそれぞれ10N, 23N





(a)加工前の砥粒 $B_4C$ (#280)のSEM写真



(b)10min加工後の砥粒 $B_4C$ (#280)のSEM写真

図3.5 加工前後の砥粒のSEM写真

であった．なお粒径は，採取した砥粒の中から任意に200個を抽出し，デジタルスケール付工場顕微鏡を用いて短径と長径を測定し，その平均をとったものである．図から，加工前の砥粒の平均粒径は $67.3\mu m$ であったが，10min間の加工後，直径4mmの工具（加工荷重10N）では $55.8\mu m$ ，直径6mmの工具（加工荷重23N）では $50.6\mu m$ となった．この結果より，加工圧力が同じであっても工具の加工面積が大きいほど平均粒径の減少速度が速く，加工能力の劣化が激しいことが確かめられた．しかも工具径4mmの場合には，10min間の加工後も粒径 $90\sim 100\mu m$ 領域の砥粒も依然として存在しており，新規



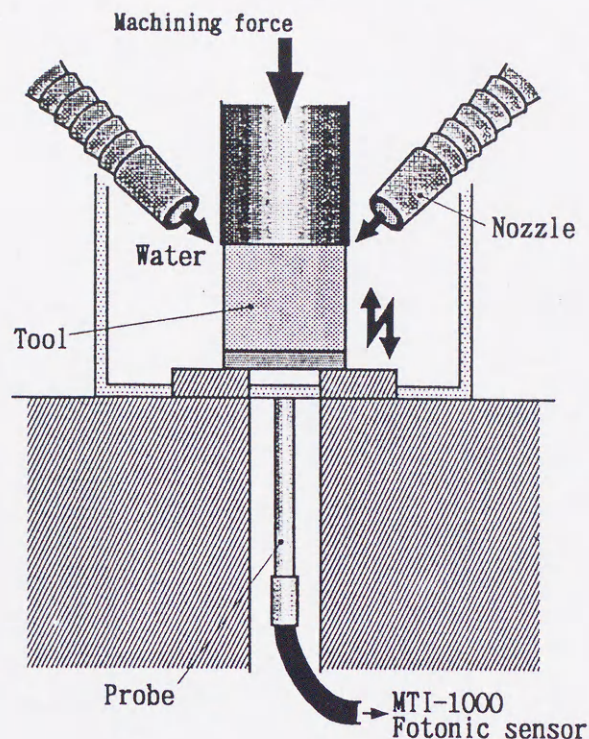


図3.6 工具振幅の計測方法

砥粒の流入が続いていることが示唆される．これに対して工具径6mmの場合には，この領域の砥粒は全く消失しており，加工孔の中心部付近では新規砥粒の流入はほとんどなかったと思われる．

図3.5に工具径4mmの場合に使用した加工前後の砥粒のSEM写真を示した．10min間の加工後の砥粒表面には工作物であるSiCの微細な加工くずが付着しているのがわかる．

次に実験に用いた超音波加工機の加工荷重と工具振幅の関係について調べた．図3.6に工具振幅の計測方法を示す．すなわち，工具に対向する工作物の中心にのぞき孔を開けて光学式非接触変位計（応答周波数70kHz）のプローブを挿入し，工具端面の振動変位を直接測定する方法を採った．したがって，スラリを使用した実際の加工では加工液の透明度が悪く測定が困難であったため，スラリの代わりに水を使用した．

得られた加工荷重と工具振幅（全振幅）の関係を図3.7に示す．図のように，加工荷重の増加に伴って工具振幅は非線形的に減少した．なお，発振器の出力を50%にして型彫り加工をすると，本実験で使用した加工圧では孔周辺に微小な亀裂が発生したため，今



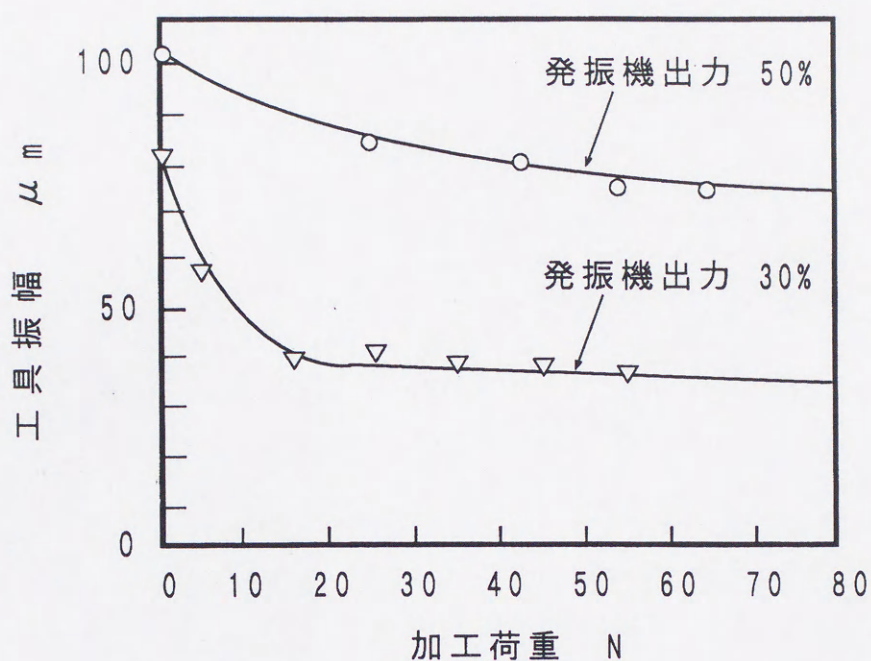


図3.7 加工荷重と工具振幅（全振幅）

回の実験では出力を 30%にした．使用した出力 30%では，無負荷時の振幅は  $81\mu\text{m}$  であったが，10N の加工荷重を掛けた場合には  $50\mu\text{m}$ ，さらに 23N では  $40\mu\text{m}$  に減少した．

すなわち工具振幅の減少は 20%にも及び，これは高負荷時には砥粒交替を阻害する大きな要因となると考えられる．なお超音波振動は，振動子の収縮によって発生し，しかも振動の中立点にはオフセットがあり，振動の開始と共に振動子が下方に  $\Delta f_p$  だけ送り込まれることが明らかになった． $\Delta f_p$  の値は付加した加工荷重に依存し，10N では  $26\mu\text{m}$  であった．

### 3.4 加工クリアランス

さて，実際の加工中にスラリが流入する空間，すなわち工作物表面と工具端面との間の距離は，振動中の工具の最下点と工作物表面間の距離（以下，これを加工クリアランス  $c_p$  と呼ぶ）に工具振幅が加わったものになる．上の実験では，スラリを使用していないので，加工クリアランスは零である．そこで，次に，実際の加工時における加工クリ



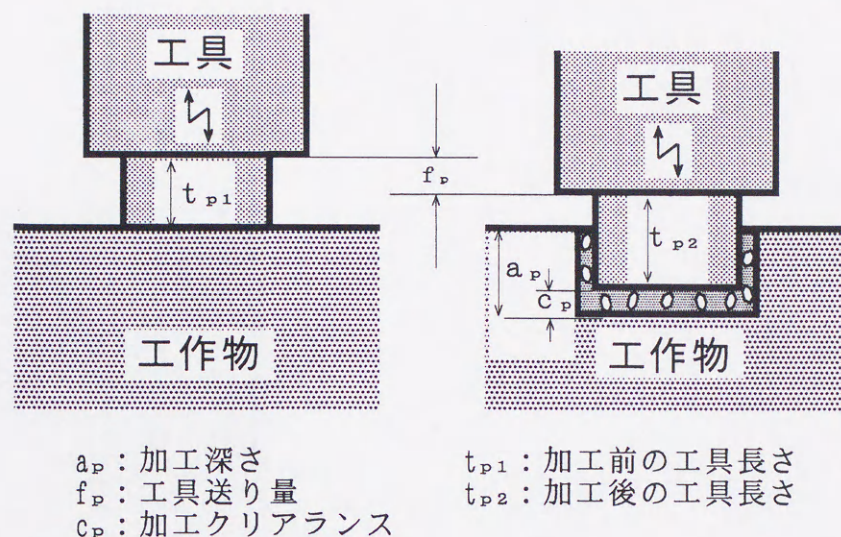


図3.8 加工クリアランスの計測方法

$$c_p = a_p + (t_{p1} - t_{p2}) - (f_p - \Delta f_p) \quad (3 \cdot 1)$$

アランス $c_p$ を求める実験を行った。

図3.8にその求め方を示す。図で(a)は加工前の状態を示し、加工クリアランス $c_p$ は零である。(b)は加工中の状態を示す。(a)の状態を基準にして工具送り量を $f_p$ 、加工深さを $a_p$ 、さらに加工前の工具長さを $t_{p1}$ 、加工後の工具長さを $t_{p2}$ とする。工具送り量 $f_p$ には中立点のオフセット量 $\Delta f_p$ が含まれる。したがってこのとき、加工クリアランス $c_p$ は以下のようなになる。ここで $(t_{p1} - t_{p2})$ は工具磨耗量(長さ)である。(3.1)式で、加工深さ $a_p$ は工作物表面と孔の底部との段差を触針式の表面粗さ計を用いて測定した。工具送り量 $f_p$ は、振動子の節の位置でダイヤルゲージを用いて測定した。また加工前後の工具長さ $t_{p1}$ 、 $t_{p2}$ は、デジタルスケール付工場顕微鏡を用いて直接測定した。

直径4mmの工具を使用し、加工荷重を10Nとしたときの加工時間に対する累積工具磨耗量(長さ)を図3.9に示す。これは途中で加工を中断して測定したものではなく、各点



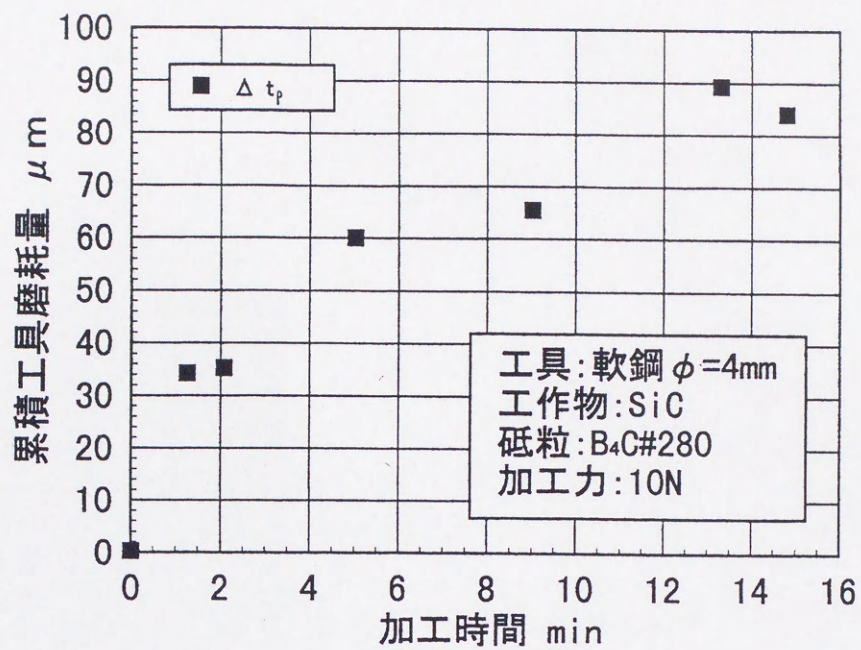


図3.9 累積工具磨耗量（長さ）

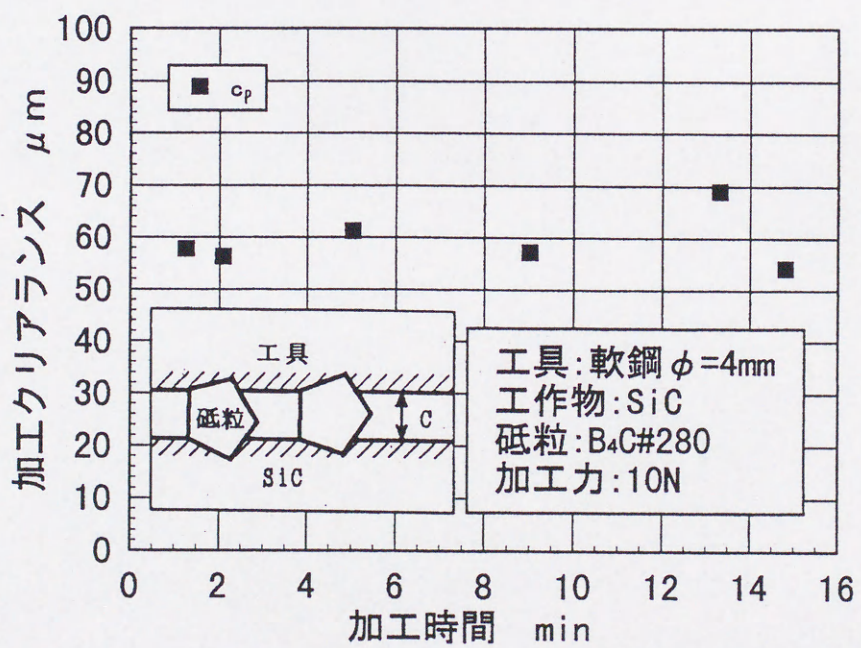


図3.10 加工クリアランス



ごとに繰り返し実験を行ったものである。図3.10は、図3.8の結果を用いて(3.1)式から求めた加工クリアランス $c_p$ と加工時間との関係である。多少のばらつきはあるものの加工クリアランスはほぼ $55\sim 65\mu\text{m}$ の範囲内であった。このように加工クリアランスは砥粒の平均径にほぼ等しく、超音波加工における材料除去が砥粒を介したハンマリング<sup>3)</sup>によって起きていることを示している。しかしこの実験からは、砥粒の破碎に伴って加工クリアランスが減少するような結果は認められなかった。

### 3.5 加工孔底面の突起生成

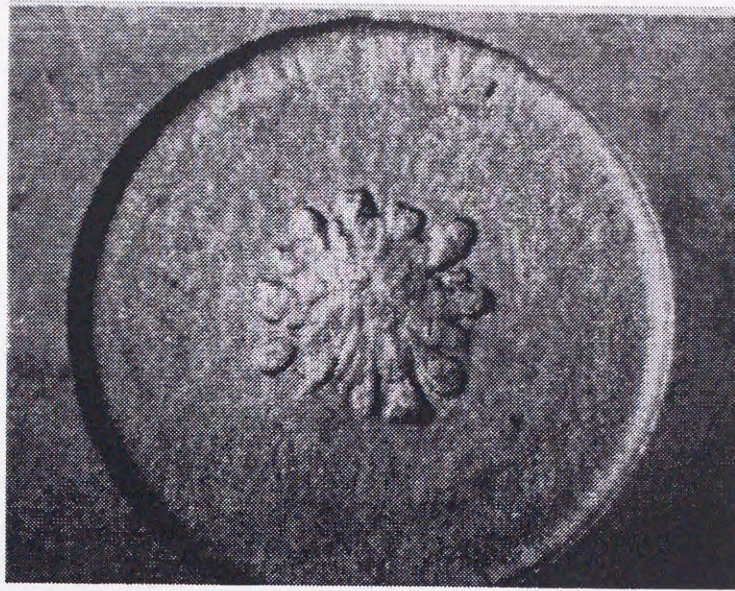
加工時間の経過に伴う加工速度の低下(図3.3)の原因として、工具と加工面の間に介在する砥粒の破碎による劣化を考えた。そして実際に、加工点近くの砥粒を採取してその分布を調べたところ、加工時間の経過と共に砥粒の平均径が減少しているのが確認された。しかもこれは、工具径が大きいほど顕著であることも明らかになった。しかし前述のように、加工クリアランスでは、特に加工時間に伴う変化は確認できなかった。

図3.8の実験で加工深さは、孔の周辺部に近いところで測定した加工表面から加工孔底面までの深さである。しかし加工孔の底面は、加工の進行に伴って平坦でなくなることが確認された。そこで、走査型電子顕微鏡(SEM)により加工孔底面の観察を行った。

図3.11は、4mm直径の工具で加工した孔の全体図と拡大した約1/4部分のSEM写真である。これは加工初期で、累積加工量(深さ)は $115\mu\text{m}$ (加工時間2min)であった。加工孔底部は全体的に平坦であるが、中央に放射状の溝を持った菊型の盛上がりが形成されている。また超音波加工における材料の除去が砥粒を介したハンマリングであることを考えると、たとえば放電加工面のように加工面は微小なクレータの集合になるはずであるが、実際には図から分かるようにむしろ放射状の短い条痕の集積であった。これは、工具によるハンマリングと同時に、ポンピング作用によって砥粒が放射状に往復運動を繰り返し、砥粒の転動や切削によって材料除去が行われたことを示している。特にポンピング作用により、スラリは工具の中心に向かって放射状に往復運動を繰り返す。

したがって工具中心部では同じ砥粒が出入りを繰り返すだけで新しい砥粒が侵入し難く、破碎した砥粒の更新が速やかに行われない。特に径の大きい工具の場合にはその傾向が顕著で、工具中心部で加工速度が低下し周辺部との間に差が生じるため、図のような盛上がりが形成されたものと考えられる。





加工孔全体  $\phi 4\text{mm}$  工具

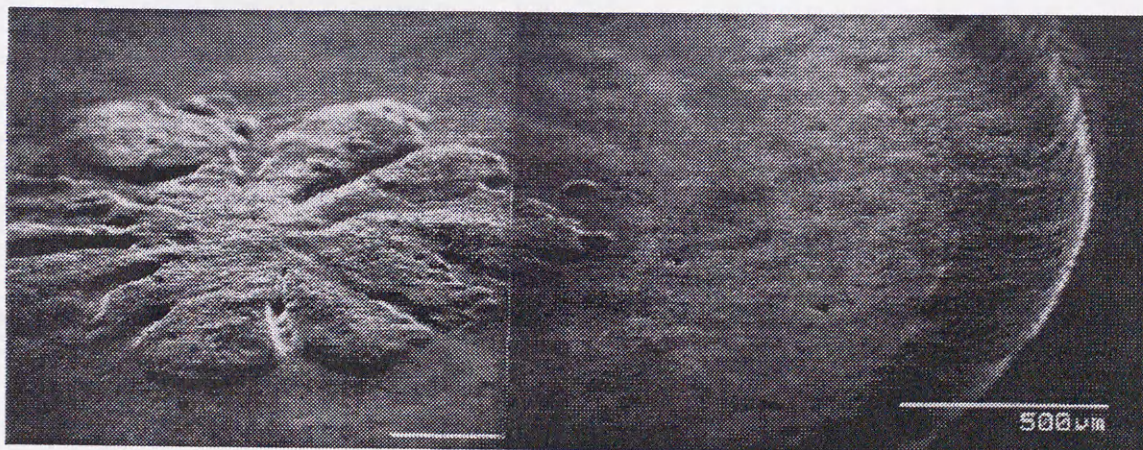
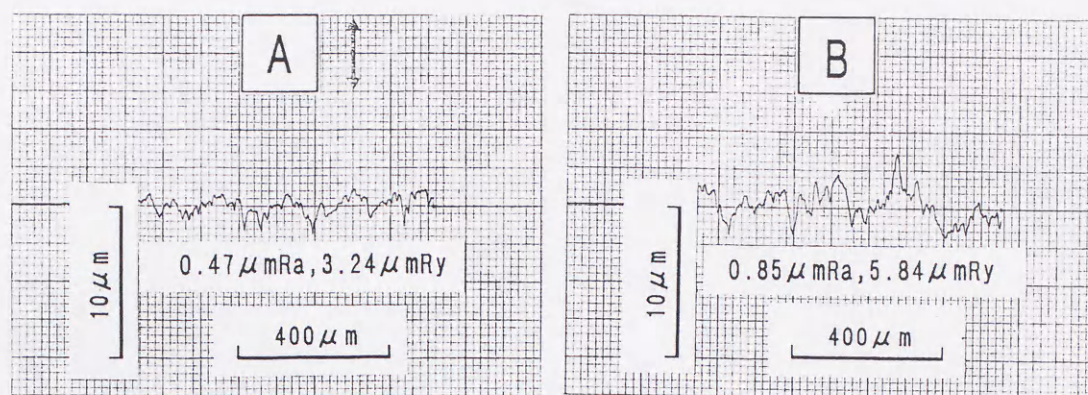


図3.11 加工孔底部のSEM写真（加工時間2min）

破碎した砥粒の更新が行われ難い中心部と、新旧砥粒の交替がスムーズに行われる周辺部との間に加工速度に差が生じると、加工クリアランスが増加する傾向がある。図3.10で、加工時間の経過に伴って加工クリアランスが減少するであろうという予測に反して、むしろ僅かながら増加するような結果になったのはこのような理由による。しかし加工クリアランスは砥粒の直径以上にはなり得ないので、中心部に次第に加工圧が集中する





A部の表面粗さ

B部の表面粗さ

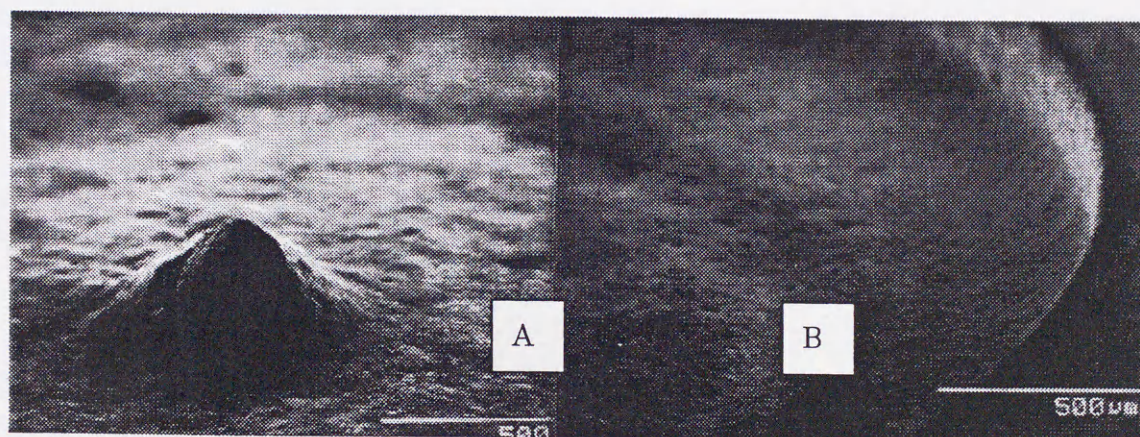


図3.12 加工孔底面のSEM写真（加工時間 9 min）

ようになり、盛り上がりは外周より次第に削り取られ、先鋭化して突起状に変化する。

図3.12は、累積加工量 $350\mu\text{m}$ （加工時間9min）のときの加工孔底面のSEM写真である。周辺部における加工速度の飽和と共に、盛り上がりが周辺から除去され、先鋭化した様子が示唆されている。なお図には中心部Aと周辺部B近くで測定した表面粗さプロファイルを示した。周辺部に比べ中心部では表面粗さが小さい。これは、粒径の小さな砥粒によって材料除去が行われたことを示唆している。

一方、破碎によって材料除去が行われる工作物（セラミックス）と軟鋼製の工具の間には、材料除去メカニズムに基本的な相違がある。工具は工作物に比べ硬度が低く、靱性が高い。したがって工作物底面に形成された突起のハンマリングによって塑性変形し、工具面には窪みが生成される。図 3.13 は、累積加工量  $350\mu\text{m}$ （加工時間 9min）のと



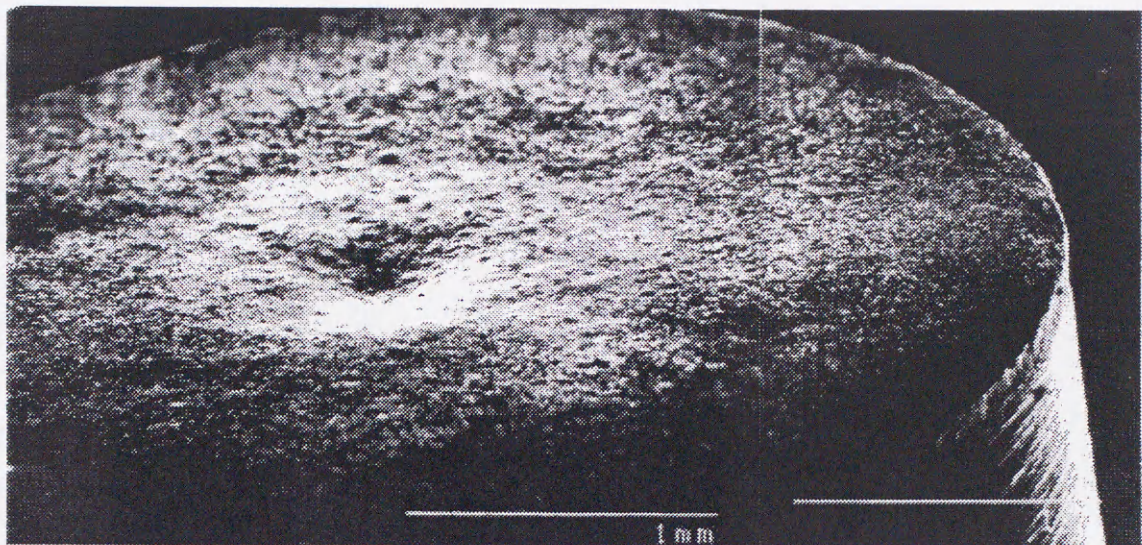


図 3.13 工具中心部の SEM 写真（加工時間 9min）

きの工具中心部のSEM写真である．この時点で，比較的平坦な周辺部を基準に測定した工具磨耗量は $65.3\mu\text{m}$ であった．

以上の観察結果から，超音波型彫り加工における加工の停滞現象のメカニズムは次のように説明される．加工孔の中心部において破碎による砥粒の劣化が進み，周辺部との間で加工速度に差が生じると，加工孔の中心部に盛上がり（ビルアップ）が形成される．砥粒の更新が比較的容易な孔周辺部では加工が進行するが，加工クリアランスは砥粒の粒径以上にはなり得ないので，やがて孔中心部の加工速度に引きずられる形で，全体の加工速度は低下する．それに伴って加工圧が次第に中心部に集中し，盛上がりは突起状に成長する．

一方，工具は砥粒の貫入による塑性変形によって磨耗が進行するが，中心部への加工圧の集中により窪みが形成される．工具径が大きいほど，中心部での砥粒の更新は困難になり，しかも工具振幅も小さくなるので，この現象が強く現れる．極端な場合には，工具と工作物の間に砥粒が全く供給されなくなり，両者が直接接触するようになる．このような状況下では，工具を一旦引き上げて，強制的に新しい砥粒を供給しない限り，加工は全く行われなくなる．



### 3.6 結 言

超音波型彫り加工では，加工時間と共に加工速度が低下するいわゆる加工の停滞現象が起きる．工具の挙動や加工の進行過程を調べることでそのメカニズムを明らかにした．その結果をまとめると次のようになる．

- (1)加工の停滞現象は，工具径が大きいほど顕著であることを再確認した．
- (2)工具の最下点と加工面との距離の測定結果から，加工が工具のハンマリングによって行われることを確認した．
- (3)工具のポンピング作用のため，加工面は放射状の条痕の集積によって形成される．
- (4)工具のポンピング作用によって砥粒の更新が行われるが，破碎劣化した砥粒の交代が行われ難い加工面の中心部には菊型模様の盛上がり形成される．
- (5)加工孔中心部における砥粒の劣化に伴って，加工速度が低下し加工の停滞が起きる．
- (6)加工が停滞し加工圧が次第に中央部に集中すると，加工面の盛上がりは成長し突起状になる．
- (7)それに伴って，工具に中心部に窪みが形成される．

### 第 3 章の参考文献

- (1) 島川正憲：超音波工学－理論と実際－，工業調査会 (1975)209.
- (2) L.D.Rozenberg,V.F.Kazantsev,L.O.Makarov and D.F.Yakhimovich:ULTRASONIC CUTTING, (英訳 J.E.S.Bradley) ,ISBN 0-306-10690-6,Consultants,Plenum Pub,1964.
- (3) 大平正広ら：超音波加工の力学的研究,精密機械, 27,3 (1961)168.



## 第4章 加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動

### 4.1 緒 言

超音波型彫り加工では、加工時間と共に加工速度が低下するいわゆる加工の停滞現象が問題となる<sup>1)2)</sup>。前章では、工具直径が大きいと加工孔中央に削り残しによる突起が形成されること、その結果突起と工具が直接接触し加工が停滞することを明らかにした。本章では、工具直径が加工孔中心部の突起形成過程にどのような影響を与えるかを調べた。また加工中に工具端面と工作物の間に存在する砥粒の粒径分布を測定するとともに、砥粒挙動を高速度カメラで観察し、突起形成のメカニズムを明らかにした。

### 4.2 実験装置および実験条件

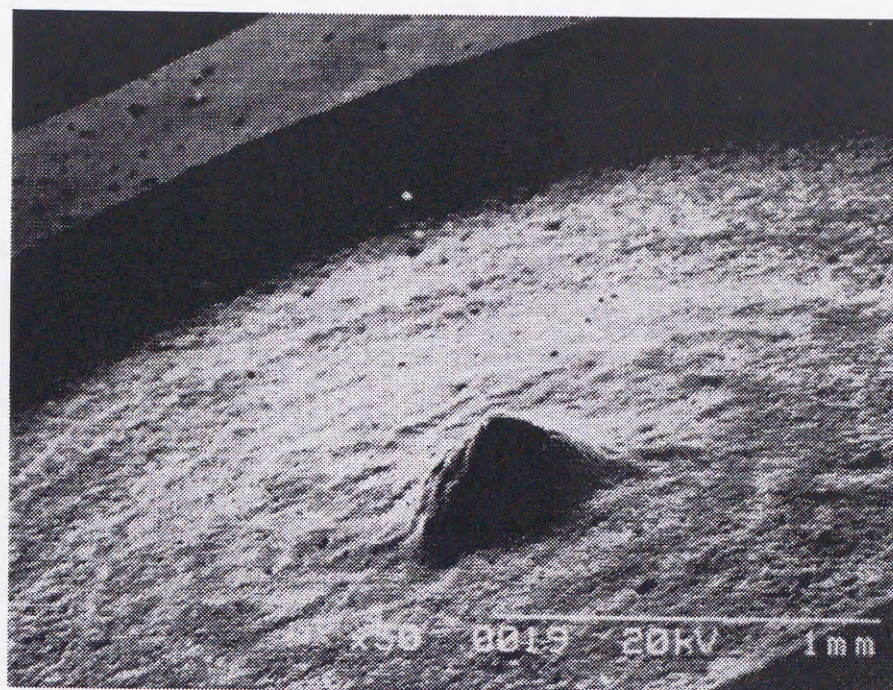
#### 4.2.1 超音波加工実験

実験には前章で試作した超音波加工機（最大出力1kW、共振周波数16kHz）を用いた。この加工機は、ボールねじとステッピングモータにより、リニアガイドに沿って振動工具ユニットを上下に送る構造になっている。振動子ユニットは、振動子、コーンおよびホーンから成り、ホーン先端には工具がハンダ付けで固定されている。さらに動力計によって加工力を常時監視しながら、パソコン制御による工具送り操作により加工圧力を制御するシステム構成になっている。

実験には軟鋼製の円柱状工具を使用した。工具の直径は4, 6そして8mmの3種類とし、加工力を変えることにより工具直径が変わっても加工圧力（0.8MPa）は変わらないようにした。スラリーには、水に $B_4C$ 砥粒（#280）を重量比で14%混合したものを使用した。これを遠心ポンプにより加工部分に1.7 l/minで供給した。加工実験には高硬度で突起の成長が顕著なSiC（東芝セラミックス製CERASIC-B、縦50mm×横20mm×厚さ13mm）を用いた。なお、工具端面と工作物間の砥粒の挙動を観察する場合には透明なガラス板を用いた。

図4.1に、(a)加工孔のSEM写真と、(b)その断面形状の模式図を示す。(a)のように加工底面の中央部には、削り残しによる突起が形成された。ここで(b)に示したように、工作物表面から加工孔最深部までの距離を加工深さ $a_p$ 、加工孔最深部から突起先端までの距離を突起高さ $h_p$ と定義する。突起高さ $h_p$ は、触針式粗さ計を用いて、直交する任意の2





(a) 加工孔のSEM写真



$a_p$  : 加工深さ     $h_p$  : 突起高さ

(b) 断面形状

図4.1 加工孔底部のSEM写真と断面形状

方向から加工孔底面の突起のほぼ頂上を通る断面曲線を測定し、それより求めた山の高さの平均値とした。また加工深さ $a_p$ は、 $500\mu\text{m}$ 以下の場合には触針式粗さ計で、それ以上の場合にはダイヤルゲージで測定した。実験条件を表4.1に示す。



表4.1 実験条件

振動数	16kHz
工具	軟鋼 (S45C) $\phi 4, \phi 6, \phi 8\text{mm}$
振幅	$45\mu\text{m}, 39\mu\text{m}, 36\mu\text{m}$
工作物	SiC (東芝セラミックス製 CERASIC-B) かさ密度 $3.15\text{g/cm}^3$ 曲げ強さ (室温) $450\text{MPa}$ ビッカース硬度 2300
スラリー	$\text{B}_4\text{C}$ (#280) 砥粒を水道水に 重量比で14%混合
加工力	10, 23, 40N
加工圧力	$0.8\text{MPa}$

#### 4.2.2 工具・工作物間の砥粒の採取方法

前章では、砥粒は工具のポンピング作用により半径方向に出入りを繰り返すので、中心部ほど砥粒の更新が行われ難く、加工時間と共に粒径が減少すると考えた。本章ではこのことを確かめるために、工具端面と工作物の界面における砥粒径分布を調べた。図4.2に砥粒の採取方法を示す。まず SiC の工作物を2つに切断し、その間に図のように厚さ  $0.5\text{mm}$  の SiC 薄板を挟み、 $0.5 \times 0.5\text{mm}^2$  の砥粒採取孔を設けた。採取孔は  $2.0\text{mm}$  の間隔で2個設けたので、直径  $4\text{mm}$  の工具では、工具中心部と周辺部で砥粒を別々に採取することができる。採取した砥粒から200個のサンプルを任意に抽出し、その粒径分布を求めた。なおここで粒径は、光学顕微鏡を用いて測定した長径と短径の平均値とした。

#### 4.2.3 工具・工作物界面における砥粒挙動の観察

次に工具端面と工作物間での砥粒の挙動を、高速度カメラを用いて観察した。その実験方法を図4.3に示す。すなわち工作物として透明なガラス板 (厚さ  $1\text{mm}$ ) を用い、それを通して下方から顕微鏡で観察した。観察倍率は50倍、対物レンズの作動距離は  $15\text{mm}$  で、照明は下方2方向から高輝度光源を用いて行った。また無負荷時の工具の複振幅が  $82\mu\text{m}$  なので加工クリアランス (振動中の工具最下点と工作物表面間の距離) は  $94\mu\text{m}$  と  $141\mu\text{m}$  とした。



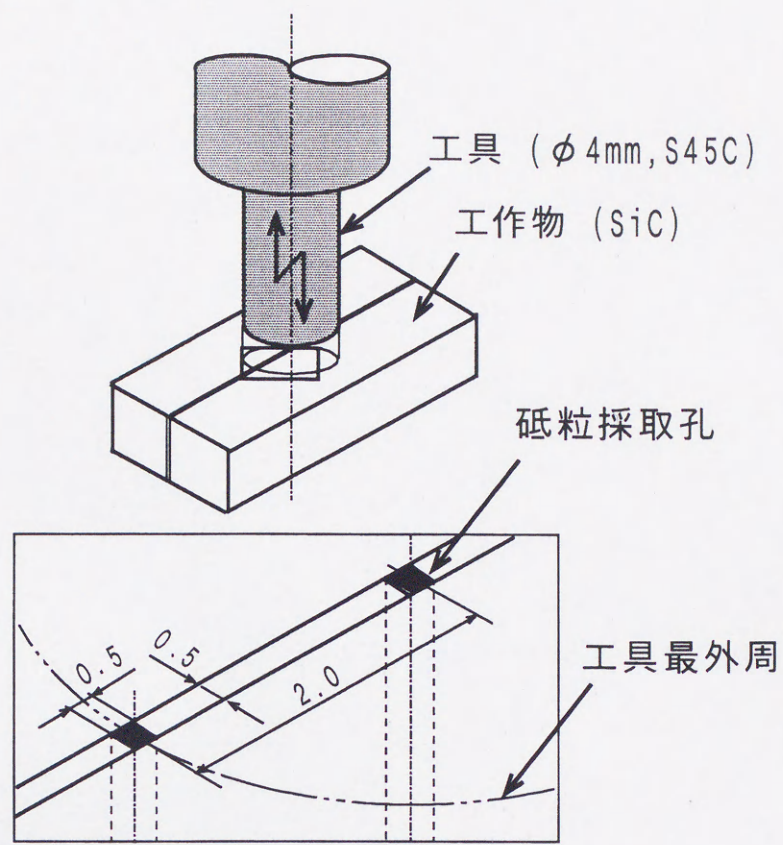


図4.2 砥粒の採取方法

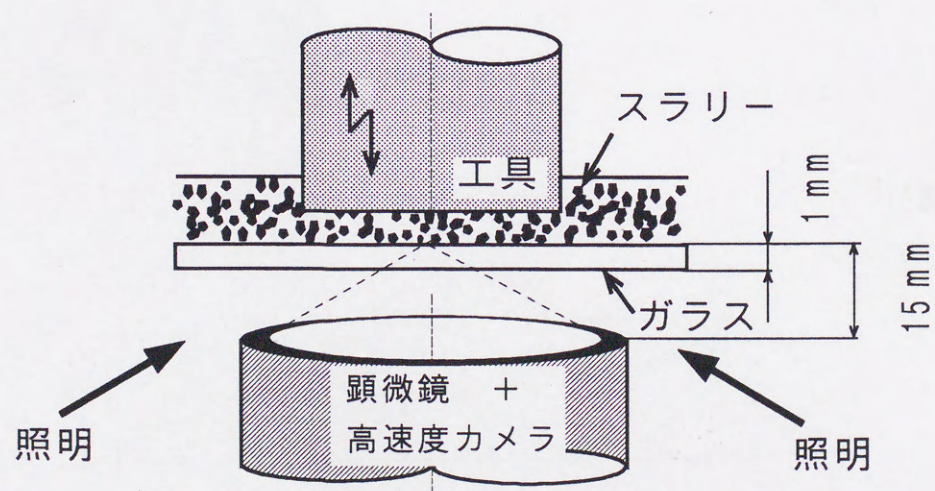


図 4.3 工具・工作物界面における砥粒挙動の観察



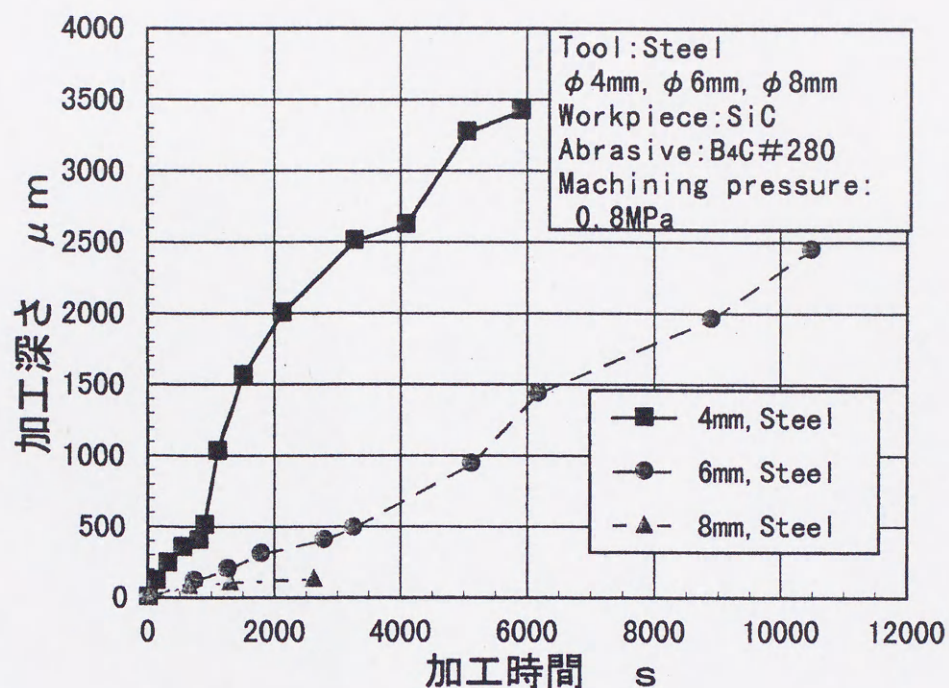


図 4.4 加工深さの時間変化に及ぼす工具直径の影響

### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 加工深さと突起高さの変化過程

図 4.4 に、加工時間に伴う加工深さの変化を工具直径をパラメータにして示す。測定のために加工を中断すると工具・工作物界面に存在する砥粒が更新されるので、各点ごとに最初から実験を繰り返した。また実際の加工では途中で適宜工具を引き上げ、劣化した砥粒を更新する作業を挿入することがあるが、本実験では常に加工圧力が一定になるように工具を連続して送り、工具の引き上げは行わなかった。加工初期に、工具直径が大きいほど加工深さの増加率（加工能率）が減少する傾向は前章と同じであった。

しかしさらに加工を継続すると、工具直径が 4mm, 6mm の場合は、一旦減少した加工能率が再び上昇する現象が観察された。これは加工孔に生じる突起の成長と大きな関係があるものと思われる。そこで、加工孔と工具の断面の時間的変化を測定した。

図 4.5(a),(b)そして(c)は、加工孔と工具の断面の時間に伴う変化を工具直径について比較したものである。また図 4.6 は、これらの断面曲線から測定した突起高さ  $h_p$  の経



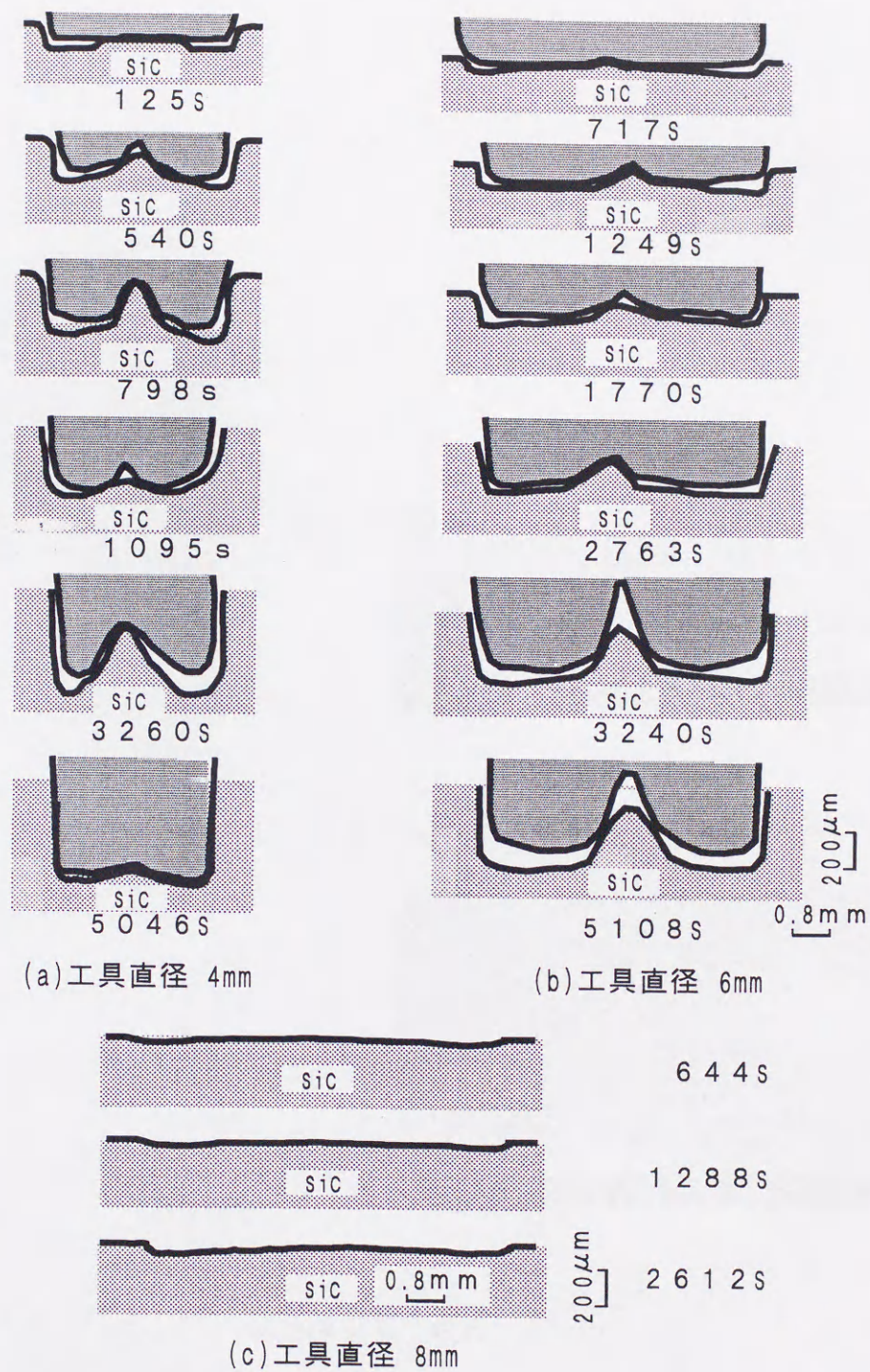


図 4.5 加工孔の断面形状の時間的变化

時変化を示したものである。これらの結果によれば、直径 4mm の工具の場合、突起はその高さ  $h_p$  の増大と共に先鋭化する。そして突起高さ  $h_p$  は 798s 近傍で一回目の極大



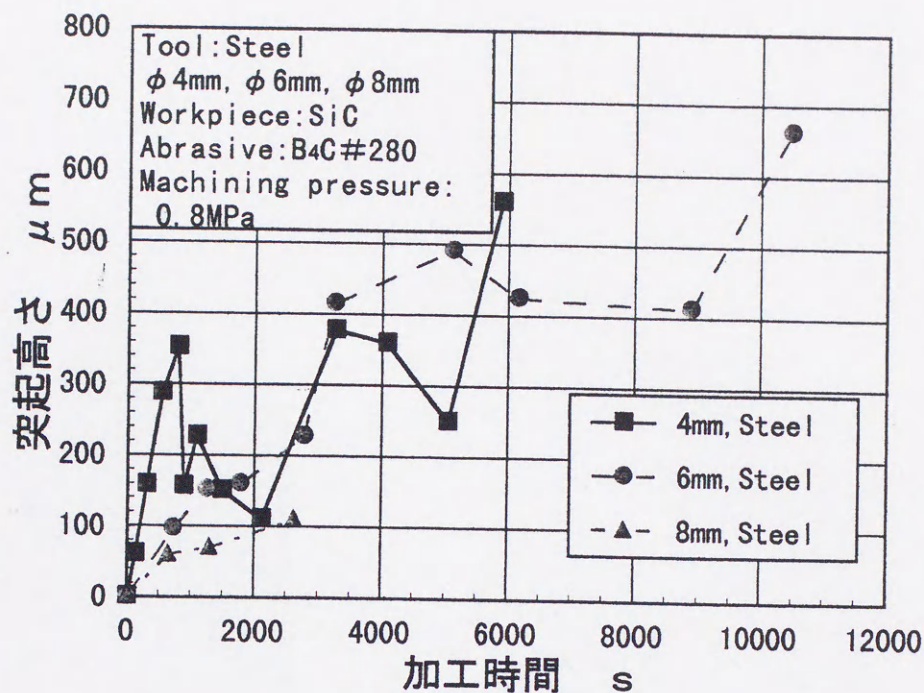


図 4.6 突起高さの時間変化に及ぼす工具直径の影響

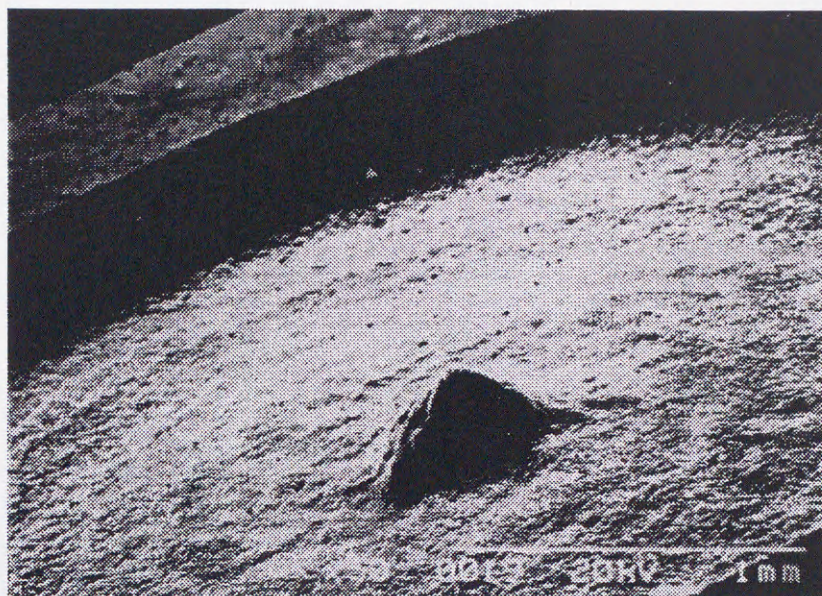
値をとり、その後は急激に減少する．突起高さ  $h_p$  が小さくなると再び加工深さは増加し始め、上述のサイクルを繰り返す．しかしこの場合の加工能率は初期の場合と比較して大きくなった．

直径 6 mm の工具の場合、加工能率は直径 4mm の工具の場合と比較し小さくなった (図 4.4)．突起高さは 500 $\mu\text{m}$  に達したところで一時減少するが、減少量はわずかで、再び増加に転じた．また加工能率についても極端に変動することはなかった．

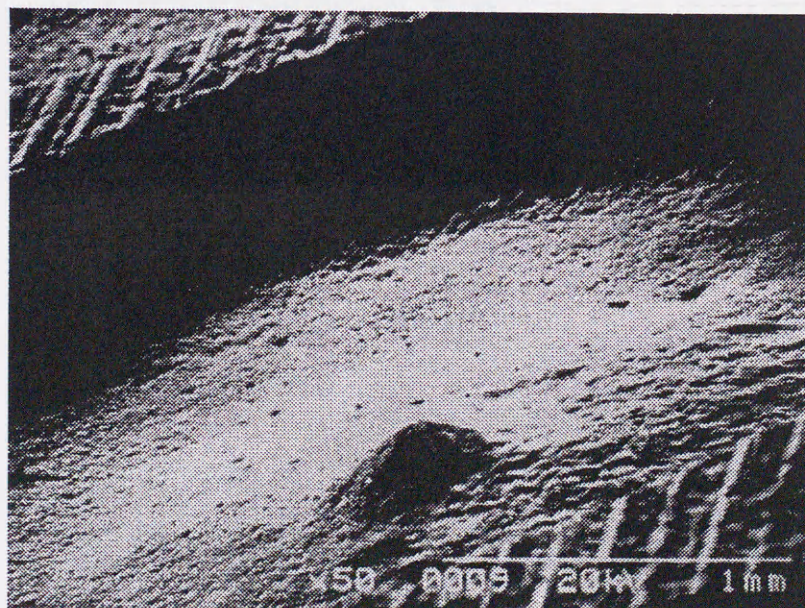
直径 8 mm の工具の場合は、図 4.5(c)から明らかなように加工能率が極端に小さくて加工不能の状態に近く、突起高さの成長もほとんどなかった．

図 4.7 に突起高さが一回目の極大値をとり、その後小さくなった加工孔の SEM 写真を示す．(a) の加工時間が 798s の場合、加工深さが 400 $\mu\text{m}$  で突起高さは 353 $\mu\text{m}$  であるのに対し(b) の 1095s の場合は加工深さが 1027 $\mu\text{m}$  もあるにもかかわらず突起高さはそれより小さく 223 $\mu\text{m}$  となった．これは突起が最大成長したあと先端に加工力が集中して破碎し、小さくなったためである．その突起の拡大 SEM 写真と破碎後の SEM 写真を図 4.8 に示す．図からわかるように突起先端にはクラックが発生している．実際に





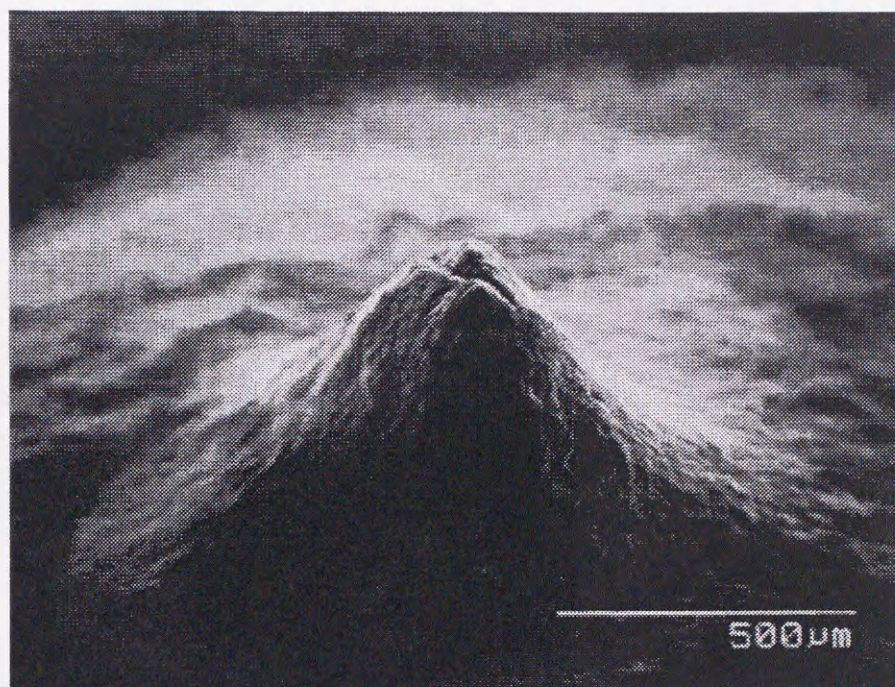
(a) 加工時間 798s, 加工深さ  $400\mu\text{m}$ , 突起高さ  $353\mu\text{m}$



(b) 加工時間 1095s, 加工深さ  $1020\mu\text{m}$ , 突起高さ  $223\mu\text{m}$

図 4.7 加工孔に発生する突起の形態





(a) 破碎前



(b) 破碎後

図 4.8 突起の拡大図



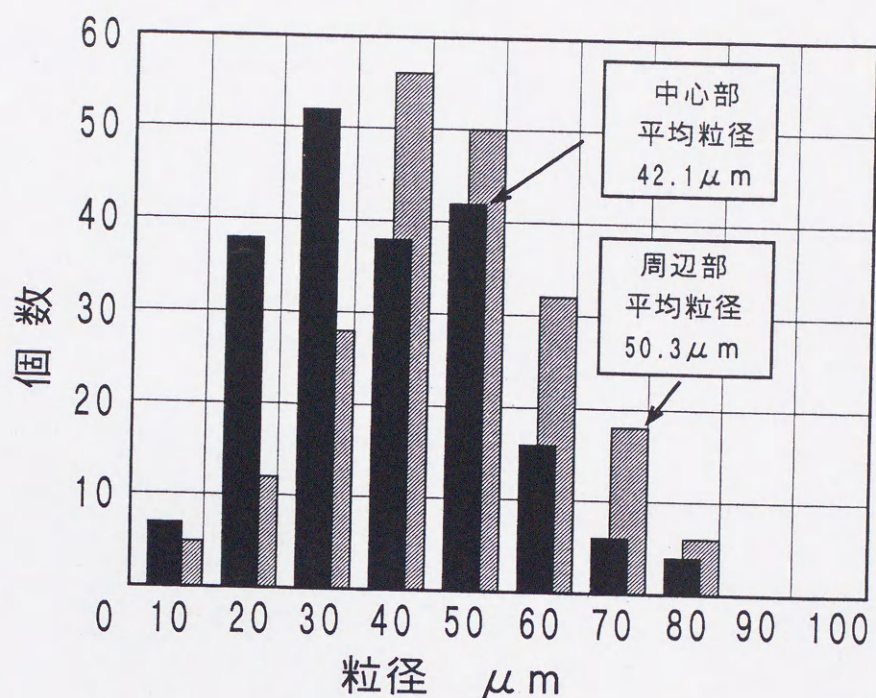


図 4.9 工具周辺部と中心部の粒度分布の相違

はこのままの状態で行われ続けるから突起は破砕して(b)のように先端が除去され工具と突起の突き当たりがなくなり再び加工が進行する。そして再び突起が形成されるものと考えられる。

#### 4.3.2 砥粒の粒度分布

加工を連続して 1500s 間行い、その間それぞれの採取孔に堆積した砥粒のできるだけ上層部からサンプルを採取し、任意に抽出した 200 個の砥粒について粒径を測定した。図 4.9 で、塗りつぶしたグラフは加工孔中心部から採取された砥粒、ハッチングをしたグラフは周辺部から採取された砥粒の粒度分布である。加工孔中心部から採取された砥粒の平均径は  $42.1\mu\text{m}$ 、いっぽう周辺部から採取された砥粒の平均径は  $50.3\mu\text{m}$  であった。

上の実験では、工具中央部と周辺部における砥粒粒径の違いは確認できた。しかし、特に加工孔中心部では砥粒密度が低く、採取孔からのサンプルの採取に長時間を要する



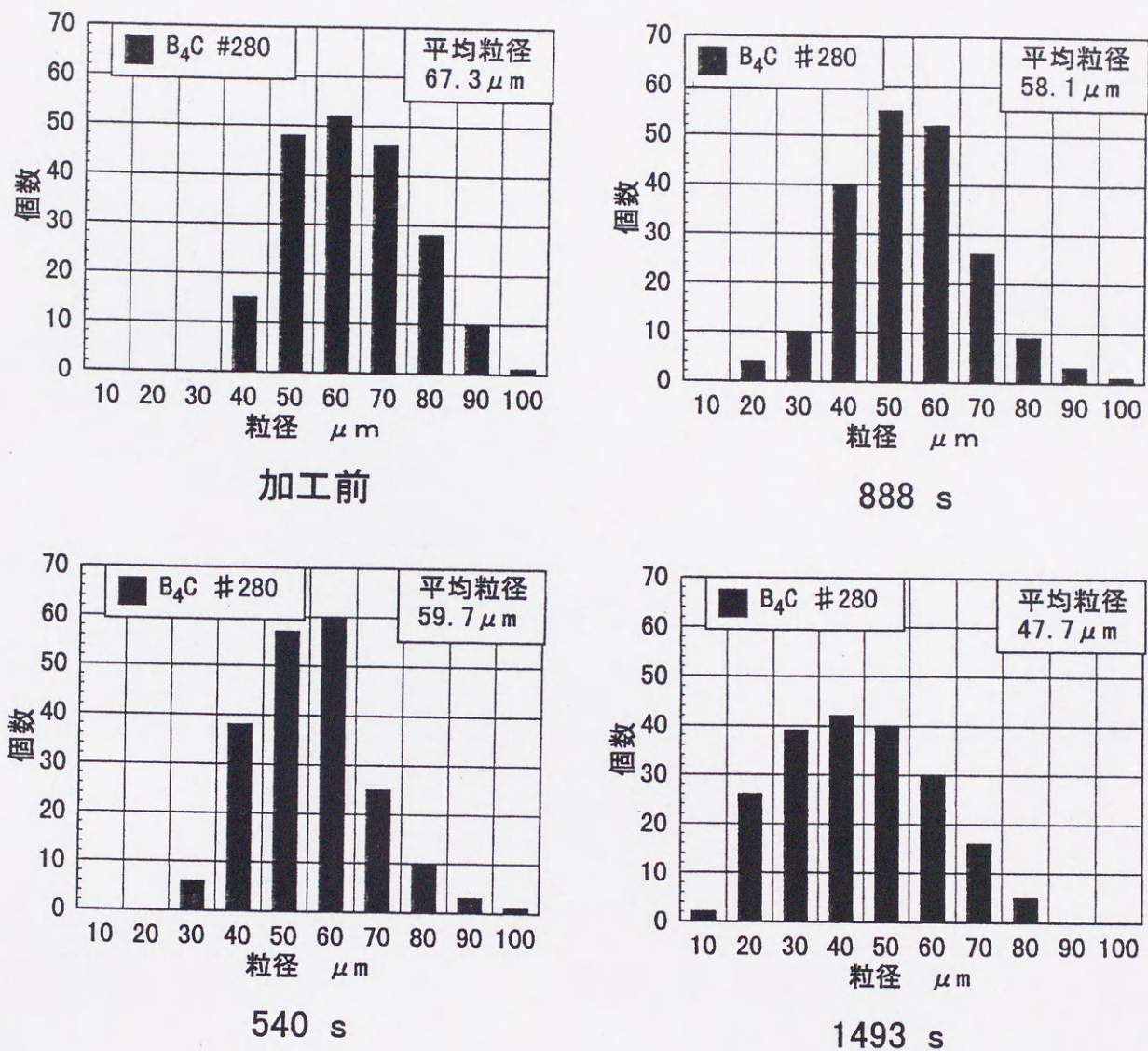


図 4.10 工具・工作物界面における粒径分布の時間的变化

ため、時間経過に伴う粒径分布の変化を確認することは困難であった。そこで加工時間を変えて加工実験を行い、加工終了後に工具面に付着した砥粒を採取し、粒径の変化を求めた。

図 4.10 は、加工前と加工時間 540s, 888s, 1493s 後の結果である。サンプルは、いずれも工具面のほぼ中央部で採取したものである。この結果から、工具中央部では、時



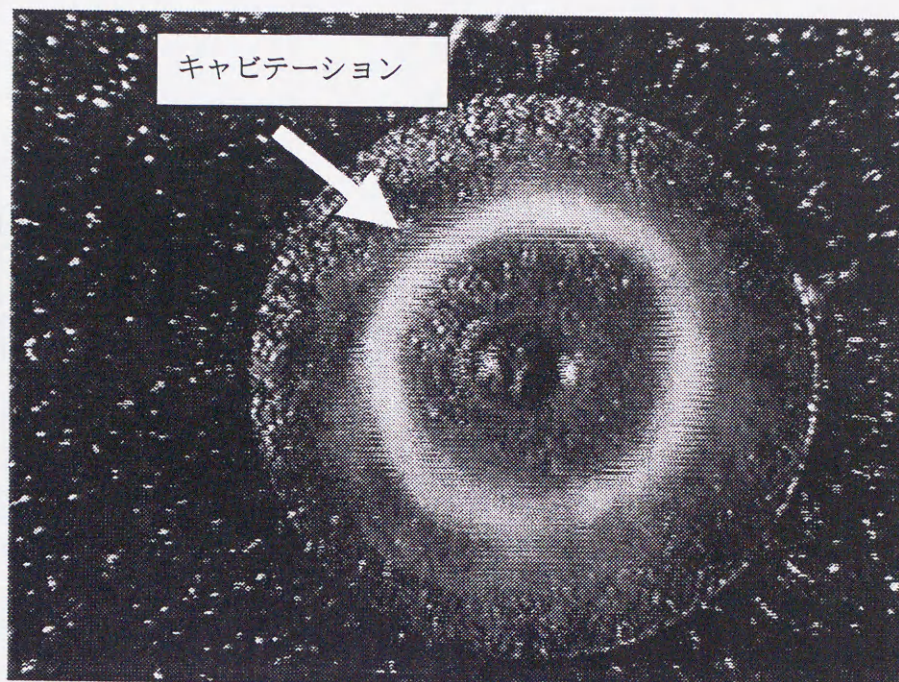


図 4.11 工具・工作物界面におけるキャビテーション

間経過と共に粒径が減少する様子がわかる。

#### 4.3.3 砥粒の挙動

最初に、スラリの代わりに水だけを供給し、観察した。その結果、工具周辺部約 1mm の部分を除いた工具端面のほぼ全域でキャビテーションによる気泡が発生した。さらに粘性の大きいシリコンオイル(125cSt, 20°C)を使用したところ、図 4.11 の写真に示すように、気泡が成長してドーナツ型のキャビテーションの領域がさらに明白に現れた。中心部の気泡はやがて時間の経過と共に成長し、大きくなった気泡が工具外周部に向かって移動して周辺部の一部から大気中へ消失するのが観察された。また大きくなった気泡が、工具端面内に停留する場合もあることも確認された。

次に、工具の側方から砥粒を混合したスラリを加え、砥粒が工具・工作物界面に分散する様子を観察した。その結果、図 4.12 に示したように、砥粒はキャビテーションによる気泡に阻まれ工具中心部へはなかなか到達できない様子が観察された。さらにキャビテーションによる気泡は工具中心部で複雑に対流し、砥粒の到達をより困難にすること



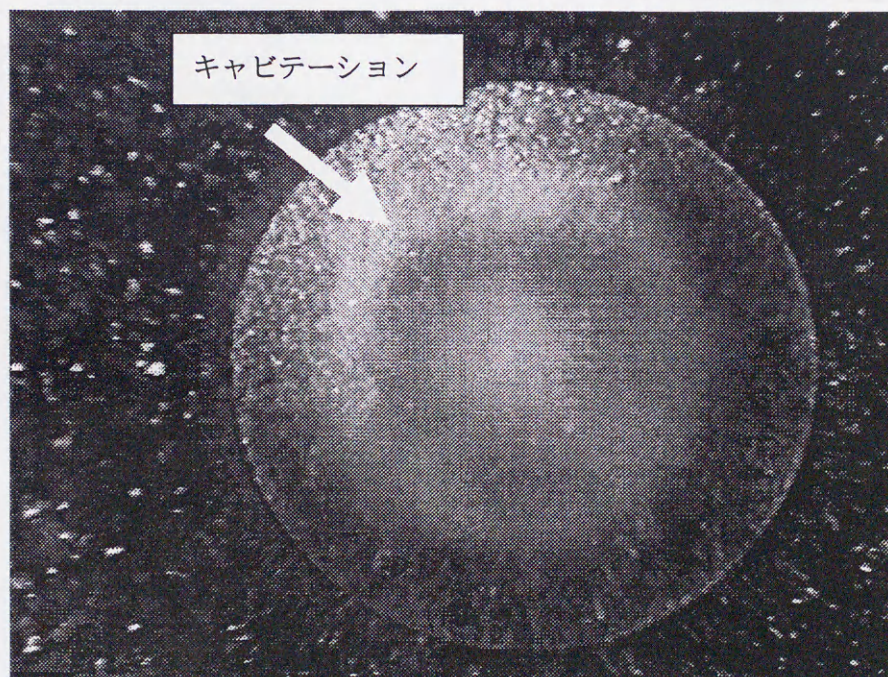
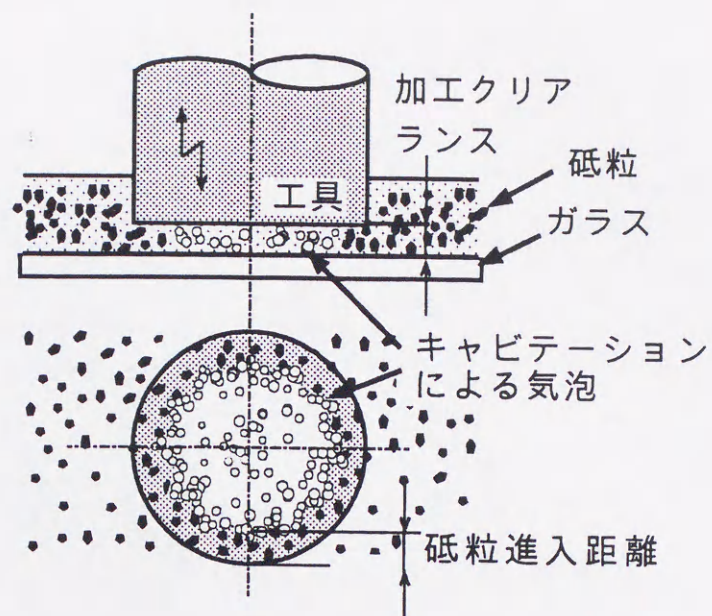


図 4.12 工具・工作物界面における砥粒の挙動

がわかった。また砥粒が周辺部から中心部に向かって出入りするときに描く模様は、前章で示した加工孔底面に生じた菊型の盛上がりに酷似していた。



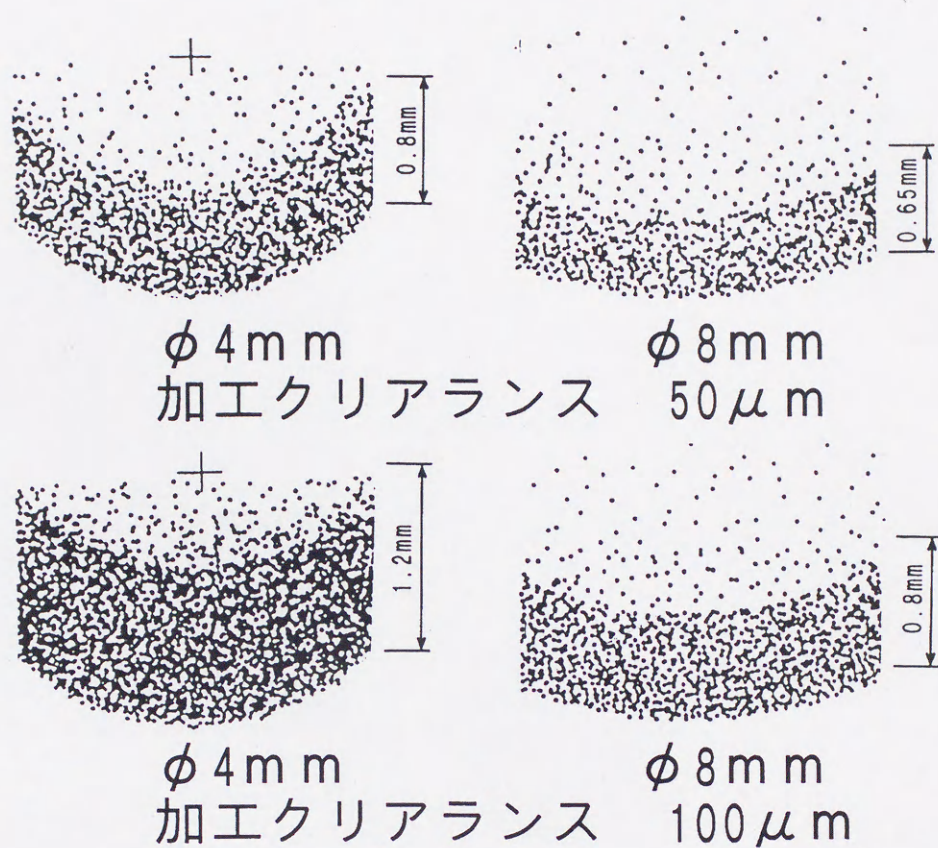


図 4.13 工具・工作物界面における砥粒の分散状態

次に砥粒が進入する様子を工具直径と加工クリアランスをいろいろに変えて観察した。図 4.13 は、高速度カメラによる砥粒の画像をエッジ強調処理し、砥粒の部分強調させたものである。砥粒密度が高い部分と低い部分との境界が明瞭に識別できる。

これらの写真から砥粒密度が高い部分の幅を砥粒侵入距離と定義し、加工クリアランスについてプロットすると図 4.14 のようになる。図から砥粒侵入距離は工具直径が大きいほどその差は少なく、また加工クリアランスが大きいほど増加することがわかった。

なお実際の加工中の加工クリアランスは、使用する砥粒径により一義的に決まり、#280 の場合約 50 μm となる。したがって直径 4 mm の工具を使って加工する場合、工具



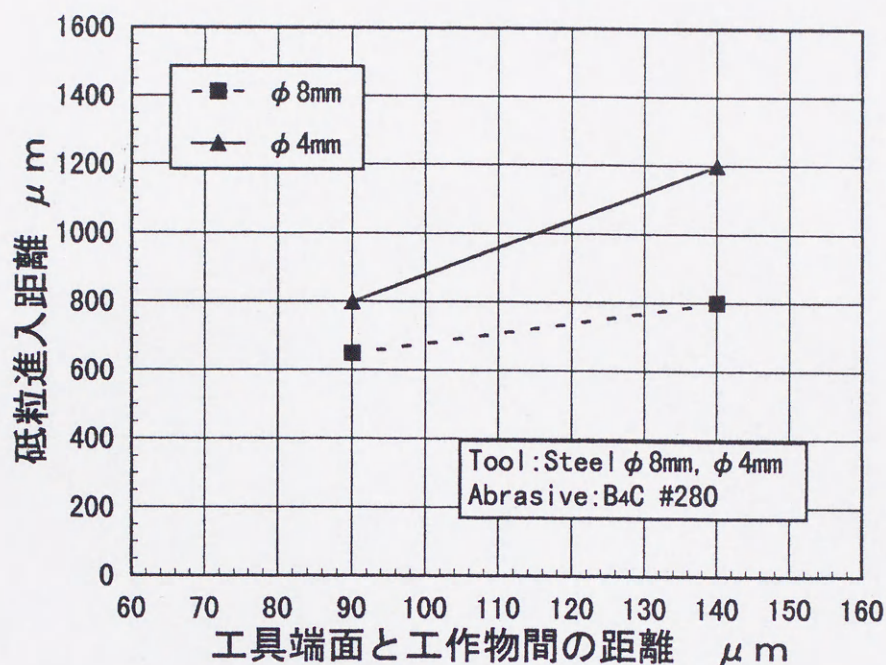


図 4.14 砥粒侵入距離に対する工具直径と加工クリアランスの影響

振幅を考慮しても、工具周辺部から約 0.9mm のところまでしか砥粒が十分に供給されていないと推察される。

#### 4.4 突起成長のメカニズム

前章では、加工孔の突起形成について次のように考えた。すなわち、超音波加工における工作物の除去は砥粒を介した工具のハンマリングによって行われる。その際砥粒はポンピング作用により、工具半径方向に出入りを繰り返す。したがって径の大きい工具では中心部ほど砥粒の更新が行われ難く、破碎によって砥粒のサイズが減少する。これに対して周辺部では砥粒の更新が行われ易いから、常に原形に近い砥粒が加工に関与する。その結果、加工孔周辺部と中心部との間で加工能率に差が生じ、突起が成長する。

実際の加工では、加工クリアランスと同程度の工具振幅が与えられる。いま工具が最下点にあるとき工具・工作物界面にあるスラリが、工具が最上点に移動したときすべて



工具中心に移動したと仮定すれば、その占める割合は工具直径の 70%になる。すなわち砥粒侵入距離は工具半径の 30%にも達する。これはポンピング作用では説明し得ない疑問であった。

本研究では、まず工具・工作物界面の粒度分布を調べた。前章で加工孔底面の粗さが大きく、中心部付近では小さいことから、中心部付近の砥粒の粒径が破碎により小さくなっていると推定した。今回の実験で、工具の中心部付近では加工時間の経過と共に砥粒の粒径が減少することが確認された。

さらに高速度カメラによる砥粒の挙動の観察により、工具中心部への砥粒の進入を阻んでいる原因が、当初予想していたような工具のポンピング作用ではなく、キャビテーションであることが明らかになった。しかも砥粒侵入距離は、図 4.13, 図 4.14 の結果から明らかなように、加工クリアランスや工具径によって大きな差がなく、外周から 1mm 弱のところにあった。直径 8mm の工具では、ほとんど加工が困難であったのはこのためである。

このようにして形成された突起がやがて先鋭化するとその先端部に加工力が集中し、塑性変形によって工具面に窪みが形成されることは前章で述べた。突起高さが減少すると再び加工能率が回復するが、その値は初期の値よりも大きくなった。これは工具外周のエッジが加工時間と共に摩耗するためと考えられる。例えば直径 4mm の工具の場合、未使用時 0.1mm だったエッジ半径が 3260s 後は 0.46mm に増大した。すなわちエッジ部を除いた実質的な工具直径が 3.8mm から 3.08mm に減少したことになる。その結果、加工圧力の増加とキャビテーション域の減少によって加工能率が増加したものと思われる。

#### 4.5 結 言

超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成の原因を明らかにするために、加工中に工具・工作物界面の砥粒の粒径分布とその挙動を観察し、以下のことが明らかになった。

- (1) 突起は形成、成長、先鋭化、衰退の過程を繰り返す。これは工具直径が小さいほど顕著である。
- (2) 工具・工作物間にキャビテーションにより気泡が発生し、加工孔中心部への砥粒の



侵入が妨げられる。

- (3) そのため加工孔中心部の砥粒は更新され難く加工能率が低下し突起が形成される。
- (4) 砥粒の侵入距離は工具直径が大きいほど小さく、また加工クリアランスが大きいほど増加する。
- (5) したがって工具直径が大きい場合には、ほぼ加工孔全面で砥粒の更新が困難になり、加工不能となる。

#### 第4章の参考文献

- (1) 島川正憲，超音波工学，－理論と実際－，(1977)206.
- (2) 楡井耕次，超音波加工，セラミックス，11,6(1976)540.



## 第5章キャビテーションと工具・工作物間の砥粒の挙動

### 5.1 緒言

超音波加工における加工速度や加工孔の形状は、工具と工作物間において加工に關与している砥粒の挙動に大きく影響を受ける。特に超音波型彫り加工のように、加工孔底部の形状精度が直接問題となる場合には、砥粒の挙動を直接観察することは重要なことである。前章において、工具・工作物間における砥粒の挙動を CCD カメラを用いて観察した結果、工具・工作物間で発生するキャビテーションによる気泡群<sup>1)</sup>のために、加工孔中心部への砥粒の侵入が妨げられ、突起が形成されることを発見した。そして、このために加工形状が劣化する原因となっていることも明らかになった。

本章では、工具断面形状がキャビテーションの発生状態に与える影響について検討するとともに、キャビテーションの影響を小さくする方法について考察する。

### 5.2 キャビテーションの観察と加工実験

キャビテーションによる気泡群の発生は、液体の圧力変動が大きいところで顕著になる。したがって超音波加工のように工具先端が加工液中に浸漬されている場合には、必ず工具端面でキャビテーションが発生する。前章での観察では、工具外周部から約 1.0mm 内側の部分を除き、ほぼ中心部全域でキャビテーションが発生していることを確認した。工具外周部でキャビテーションが発生しないのは、液体の圧力変動が緩慢になるためである<sup>2)</sup>。そこで工具中心部に孔をあけたパイプ状工具を作成し、工具の肉厚がキャビテーションの発生状態にどのような影響を及ぼすかを調べた。またキャビテーションの発生状態の違いが、加工能率や加工孔の断面形状に及ぼす影響についても検討した。

キャビテーションの観察は、前章と同様に透明なガラスセルを作成し、CCDカメラを用いて下面から観察した。超音波加工機は、第3章で試作した最大出力1kW、共振周波数16kHzのものをを用いた。スラリとして加工液（水）に砥粒を混合したものを、スラリポンプを用いて加工領域に噴射供給した。工具として直径4mmの軟鋼製円柱工具と、外径4mm、内径1.0, 1.5, 2.0mmのパイプ状工具（工具肉厚はそれぞれ1.5, 1.25, 1.0mm,



表5.1 実験条件

工具	
中実軟鋼	外径4mm
中空軟鋼	外径4mm, 内径1,1.5,2.0mm
加工液	
水道水	粘度 1.004cSt,20°C 表面張力 72.75dyn/cm,20°C
シリコンオイル	粘度 25cSt,25°C 表面張力 25dyn/cm,25°C
エタノール	粘度 1.197cSt,20°C 表面張力 22.27dyn/cm,20°C
砥粒	B <sub>4</sub> C(#280), 加工中は水道水 に重量比で14%混合
工作物	SiC (東芝セラミックス製 CERASIC-B) かさ密度 3.15g/cm <sup>3</sup> 曲げ強さ (室温) 450MPa ビッカース硬度 2300
加工力	10N

エッジ部の丸み半径はすべて0.2mm程度)を用いた。またガラス表面が加工されないように工具端面とガラス面の距離を使用砥粒の平均直径(67 $\mu$ m)より大きくし、100 $\mu$ m一定とした。

次に、SiCを工作物として加工実験を行った。実験条件を表5.1に示す。加工力は、工具振幅を同じにするためにすべての工具で一定とした。

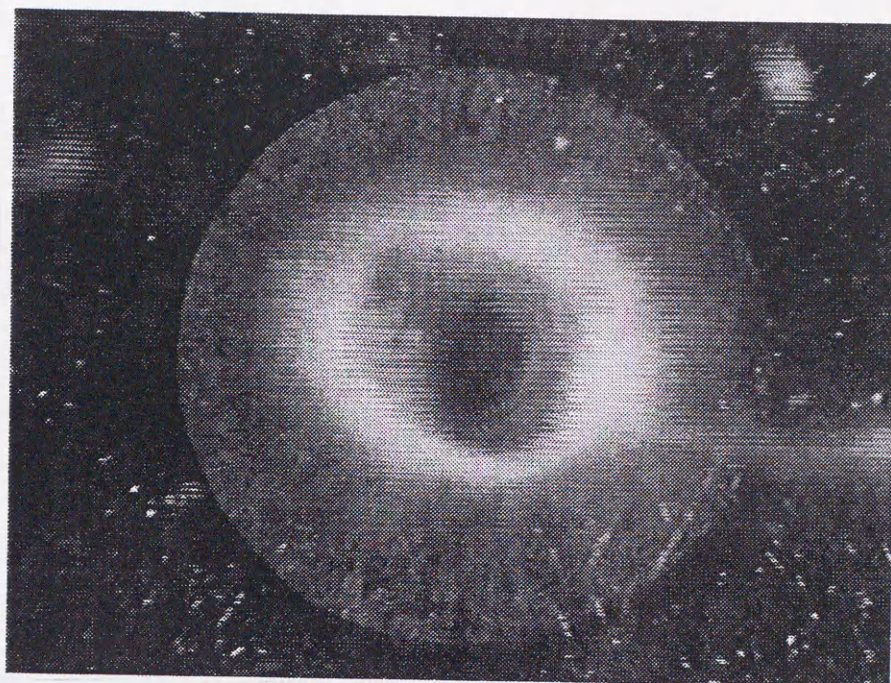
またキャビテーションの発生状態は加工液の性質、例えば表面張力、粘性係数、ガス含有量などに大きく影響を受けることが知られている<sup>3)</sup>。そこで性質の異なる水、エタノール<sup>4)</sup>、シリコンオイル<sup>5)</sup>の3種類の液体を用いてスラリを作成し、CCDカメラでの観察と加工実験を行った。

## 5.3 実験結果

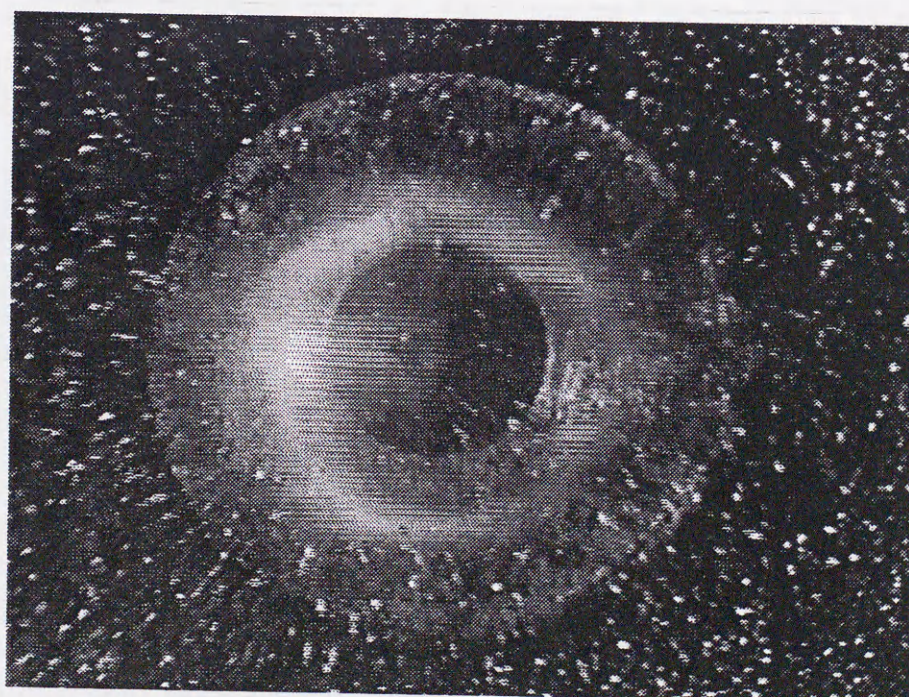
### 5.3.1 パイプ状工具によるキャビテーションの発生

前述したように工具外周部から1.0mmのところはキャビテーションが発生しにくい部分である。したがってパイプ状工具にした場合、内周部エッジ近傍も圧力変動が緩慢となり、キャビテーションは発生しにくい領域になるものと予想される。その結果、パ



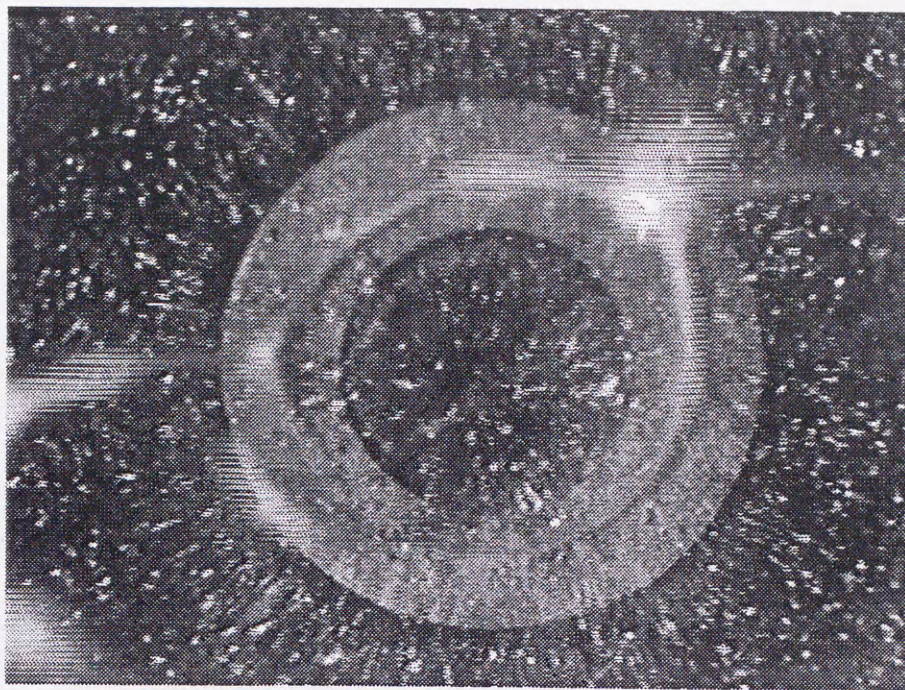


(a)  $\phi 4$  パイプ状工具, 孔径 1mm



(b)  $\phi 4$  パイプ状工具, 孔径 1.5mm





(c)  $\phi 4$  パイプ状工具, 孔径 2mm

図 5.1 パイプ状工具とキャビテーションの発生形態

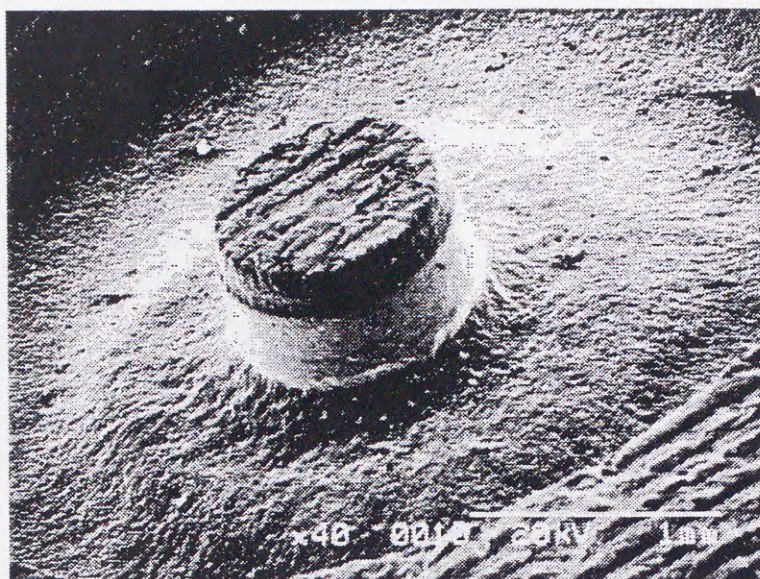
パイプ状工具の内径を大きくして工具肉厚を薄くするにしたがい、キャビテーションの発生領域は減少するはずである。

図 5.1 に、加工液としてシリコンオイルを使用したときのキャビテーション発生の様子を示す。図 5.1(a)のように内径 1.0mm 工具の場合、工具幅のほぼ中央にキャビテーションが発生し、気泡群が明確なリング状を呈していることがわかる。しかし、内径が図 5.1(b)のように 1.5mm と大きくなると、リング状の気泡の発生領域はその直径が大きくなるとともに幅薄となった。さらに図 5.1(c)のように内径 2mm の場合には気泡の発生が安定せず、しかもまばらとなり明確なリング状とはならなかった。またその発生箇所が一定ではなく、移動している状態が観察された。このようにキャビテーションの発生が不安定になった場合、工具外周部からの砥粒供給は、逆に良好になるものと考えられる。

### 5.3.2 パイプ状工具による加工速度と加工孔断面形状

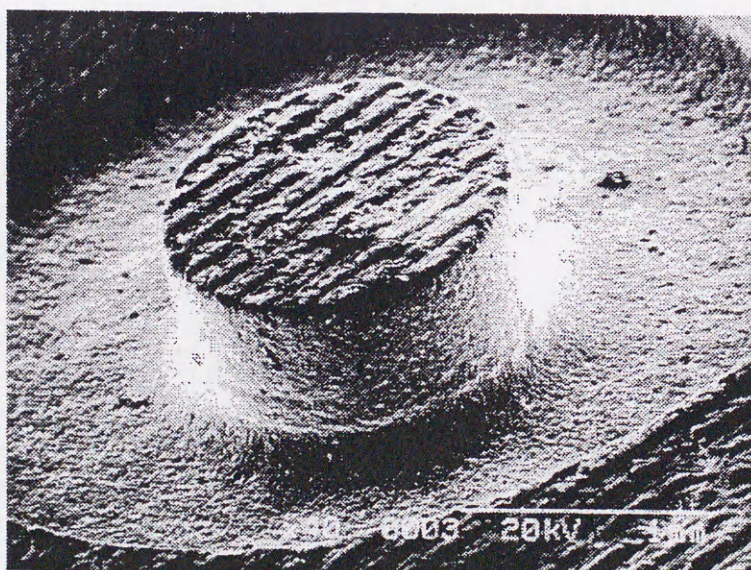
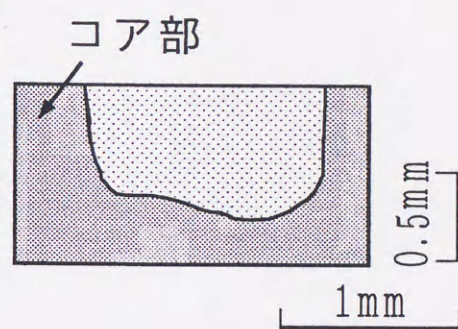
図 5.2 に、パイプ状工具で加工した場合の加工孔の SEM 写真とその断面形状を示す。





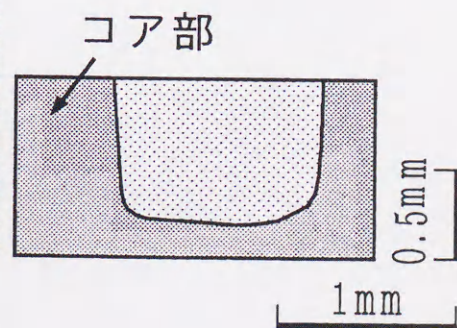
(a)  $\phi 4$  パイプ, 穴径 1 mm

加工時間 938s, 加工深さ 805  $\mu\text{m}$

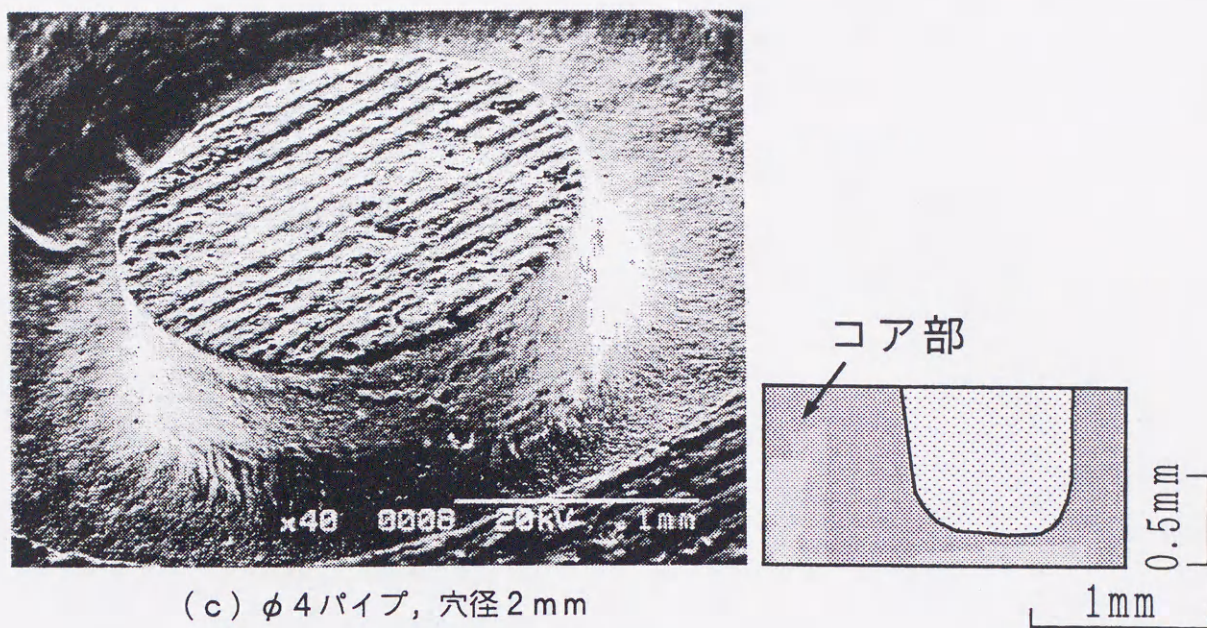


(b)  $\phi 4$  パイプ, 穴径 1.5 mm

加工時間 827s, 加工深さ 810  $\mu\text{m}$







(c)  $\phi 4$  パイプ, 孔径 2 mm

加工時間 775s, 加工深さ 850  $\mu\text{m}$

図 5.2 パイプ状工具による加工孔の SEM 写真とその断面

工具の肉厚が大きい内径 1.0mm の場合, 図 5.1(a)で示したキャビテーションの発生領域に対応する部分の加工が進展せず, 盛り上がり部がリング状に観察される。また工具内周部よりも外周部のほうが加工が進展しているのがわかる。これは前節で予想したように, キャビテーションによる気泡群により, この領域への工具外周部からの砥粒の侵入が阻害されたためである。また工具外周部での加工量が多いことから, 一様に砥粒が供給されておらず内周部より外周部のほうに多くの砥粒が存在していることがわかる。さらに内径 1.5mm 以上では, 1.0mm の時に観察されていた盛り上がり領域はほとんどなくなり, 工具両エッジ部を除いてほぼ平坦な加工面が得られた。

次に, 図 5.2 で測定した断面形状から最大加工孔深さを測定し, その時間変化を調べた。結果を図 5.3 に示す。比較のために, 中実工具の結果も示してある。中実工具の場合は, 400~800s で加工能率が低下し, 800s を越えたあたりから再び加工能率が増加している。工具中央に形成される突起の高さも後述の図 5.6(b)に示すように約 800s で最大値をとった後, 減少し, 再び増加に転じている。この傾向は第 3 章で報告したものと同様である。



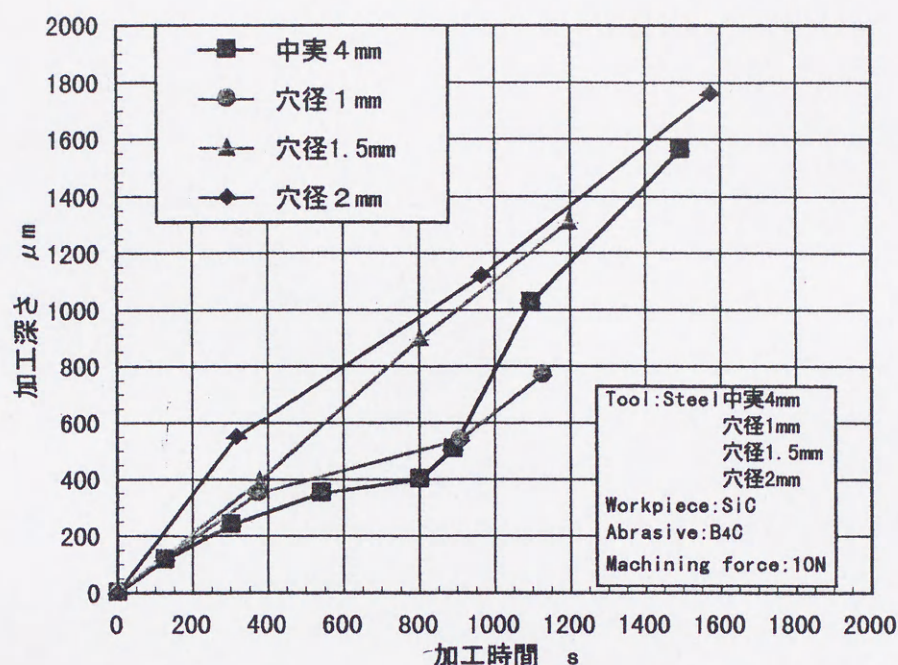


図5.3 加工深さに対するパイプ状工具の効果

一方、パイプ状工具の場合も、キャビテーションの発生が著しい内径1.0mmの場合は円筒工具とほぼ同じ傾向を示した。しかし内径が大きくなり、キャビテーションの発生が少なくなった内径1.5, 2.0mmの場合には、加工能率の停滞は観察されず、加工深さは時間に比例して増加した。このように、キャビテーションの発生が工具底面の形状精度、加工能率に悪影響を与えており、キャビテーションの発生を如何に小さくするか、あるいはその影響を如何に回避するかが重要な課題であることがわかる。本実験の場合、工具の肉厚を1.25mm以下にすることにより、キャビテーションの影響を回避できることがわかった。

### 5.3.3 加工液の違いによる加工速度の変化

前節において、工具肉厚を1.25mm以下にするとキャビテーションによる気泡群の発生が著しく減少することが明らかになった。しかし型彫り加工のように中実工具を使用しなければならない場合には、工具肉厚を変化させることはできない。したがってこの



場合、工具中心部では必ずキャビテーションが発生するから、ここではキャビテーションによる気泡の成長を小さくする方法について検討した。

一般に、気泡の成長は気泡が形成される液体の表面張力や粘性係数に大きく影響を受ける。気泡の半径を  $R$  とした場合、表面張力  $T$ 、粘性係数  $\mu$ 、液体の蒸気圧  $p_v$ 、液体内に混入しているガスの分圧  $p_g$ 、気泡壁の圧力  $p$  は次のような関係がある。

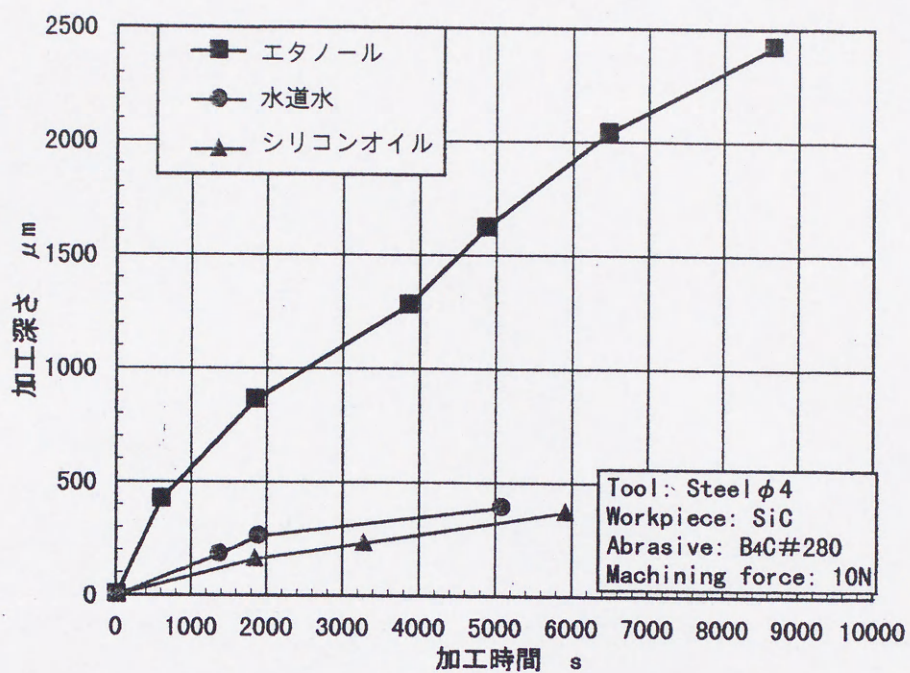
$$p_v + p_g - p = \frac{2T}{R} + \frac{4\mu\dot{R}}{R}$$

この式において、右辺第1項は加工液の表面張力の影響を、そして第2項は粘性係数の影響を示している。これから表面張力や粘性係数の小さい加工液のほうがキャビテーションによる気泡を小さく抑えられ、加工孔への砥粒の侵入が良くなると考えられる。また高圧力下の雰囲気にして蒸気圧や混入しているガスの分圧を下げることも有効な方法であると思われる。そこで前者の影響を調べるため以下のような加工を行った。

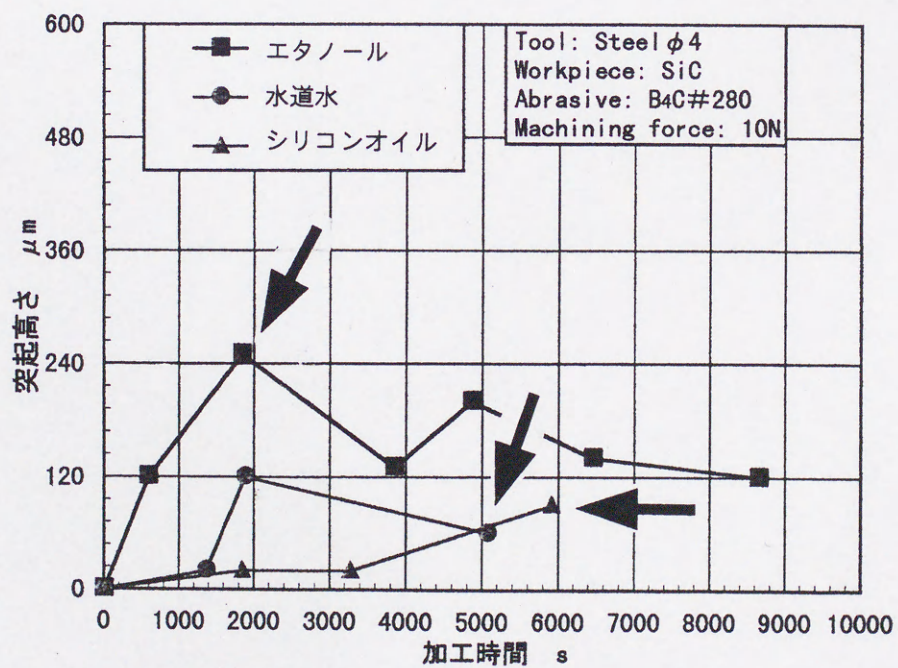
図 5.4 は加工液として水、エタノール、シリコンオイルを用いてスラリを作成し、加工を行ったときの加工深さと工具中央の突起高さの時間変化を比較したものである。なお前節のパイプ状工具を用いた実験のときのようにスラリはポンプにより噴射供給するのではなく、スラリ中に工作物を浸漬した状態で行った。そのためキャビテーションによる気泡群が工具中心部に停滞しやすく、噴射供給の場合より砥粒供給状態がさらに悪化した。水を加工液とした場合において、図 5.3 より図 5.4(a)の結果のほうが加工深さが小さいのはこのためである。しかし、このようにスラリ供給状態が悪い場合においても、エタノールを加工液として用いることにより加工能率は大幅に改善され、水の場合の約3～4倍と高い加工能率が得られることが明らかになった。

一方、エタノールの場合の突起高さは、水、シリコンオイルの場合よりも大きくなった。しかし加工深さに対する突起高さの割合を比較した場合、エタノールの0.29に対して水は0.55となり、エタノールのほうが突起が形成しにくいことがわかった。CCDカメラによる工具・工作物間のキャビテーションの観察においても、水、シリコンオイルの場合に観察されたような明確なリング状の気泡群は観察されなかった。これは気泡の直径が小さいためで、発生した気泡が十分に成長していないことを意味する。このことは、エタノールの場合にはキャビテーションによる気泡が大きくなりやすく、エロージョンが少ないという報告とも一致している<sup>6)</sup>。





(a)加工深さの変化



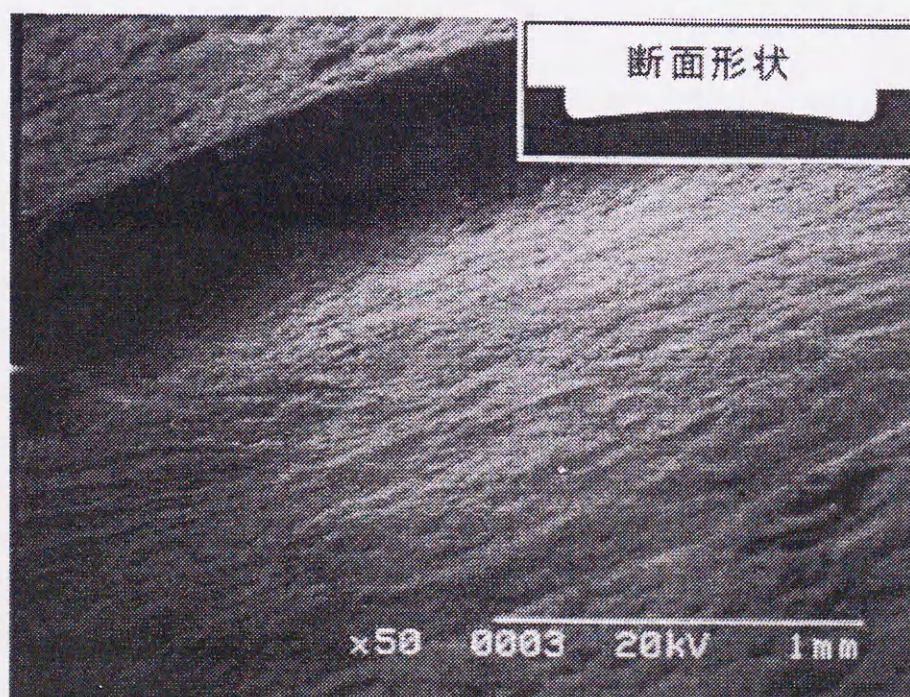
(b)突起高さの変化

図 5.4 加工液を変えたときの加工深さと突起高さ



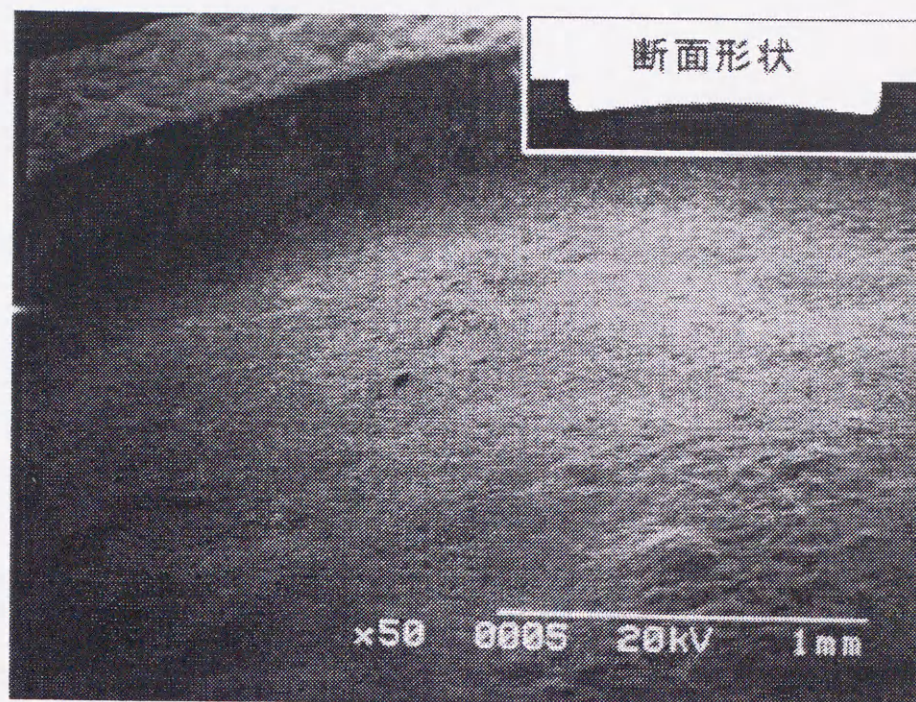


(a) エタノール, 加工時間 1838s, 加工深さ  $860\mu\text{m}$ , 突起高さ  $250\mu\text{m}$



(b) 水, 加工時間 5090s, 加工深さ  $390\mu\text{m}$ , 突起高さ  $60\mu\text{m}$





(c) シリコンオイル，加工時間 5910s，加工深さ  $370\mu\text{m}$ ，突起高さ  $90\mu\text{m}$

図5.5 加工液の違いによるキャビテーション形態の変化

図 5.5 にエタノールと水およびシリコンオイルの場合の加工孔の SEM 写真と断面形状を示す．どちらも突起高さがほぼ  $120\mu\text{m}$  となったときの写真である．図から，同じ突起高さであってもその断面は全く異なる形状となった．すなわち水とシリコンオイルの場合は中心に向かってなだらかに隆起しているのに対し，エタノールの場合は加工孔中心だけでなく，リング状に盛り上がる凹凸形状となった．これはエタノールの場合，キャビテーションによる気泡群の影響が小さくなり，工具中心部への砥粒の供給状態が改善されるものの，砥粒が加工面上に一様に分散していないことを意味する．

気泡の発生に関しては，加工液中に溶解している空気量等とも密接に関連しており，今後十分検討する必要がある．加工液中に含有されている空気を十分に脱気してから加工に供することにより，キャビテーションによる気泡の発生をある程度抑制することが可能であろうが，これに関しては今後の課題である．



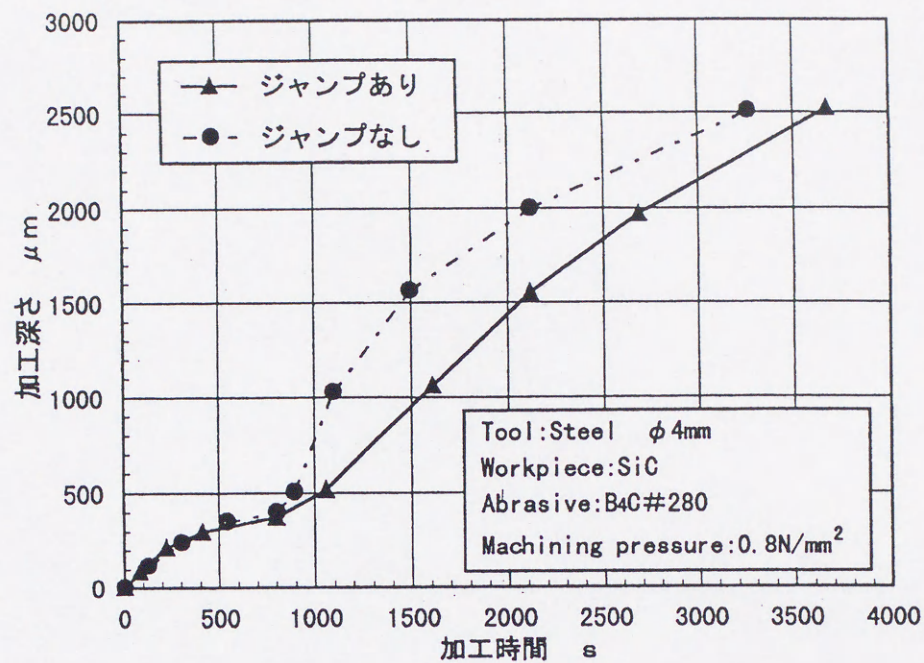
#### 5.3.4 工具引き上げ動作による突起高さの減少

工具・工作物間での偏った砥粒分布を改善し、砥粒供給状態を一様にするために、加工中に工具を一時的に引き上げながら加工を行った。工具引き上げは工具送り量  $100\mu\text{m}$  毎に行い、引き上げ高さは工作物表面から  $100\mu\text{m}$  とした。加工液は水を用い、スラリをポンプで加工部分に噴射供給した。それにより工具引き上げ中は噴射圧力によりスラリが工具・工作物間に圧送され、古い砥粒は新しいものと置き換えられる。

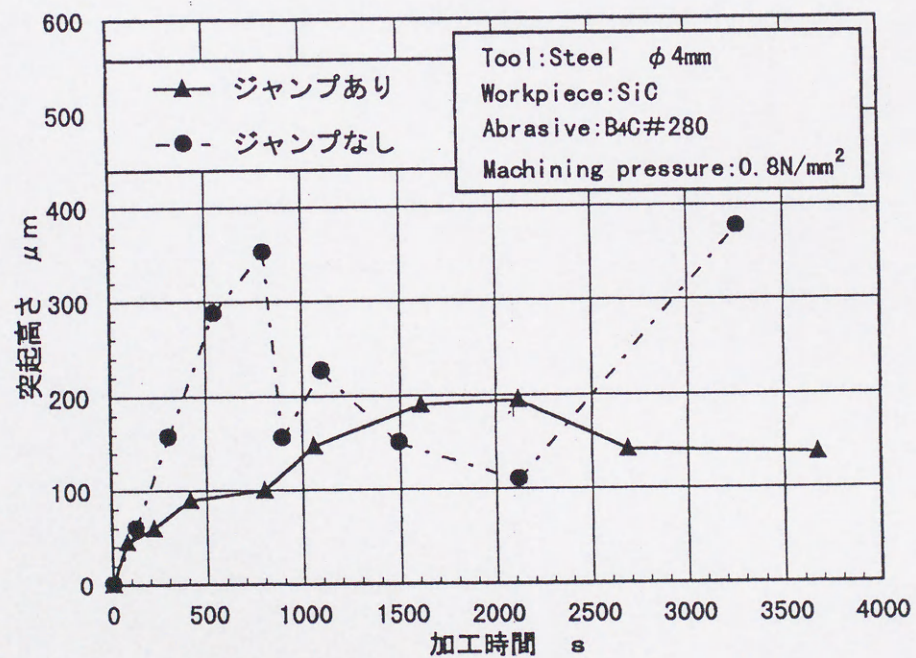
図 5.6 は工具引き上げを行った場合と、行わなかった場合の(a)加工深さと(b)突起高さの時間変化を比較したものである。なおここでの加工時間は、工具引き上げに要する非加工時間を含んだ実加工時間である。加工深さは、800s までは全く同じ変化をたどり、またその後の加工能率もほぼ同じとなった。しかし加工孔に発生する突起高さには大きな相違が見られた。図から明らかなように、引き上げ動作を行わない場合には加工開始から突起高さは急激に増加した後減少し、再び増加する傾向を示した。それに対し、工具の引き上げ動作を行った場合は、突起形成が遅くなり、突起高さの急激な変動も小さくなった。その結果、突起の最大高さは工具の引き上げ動作を行わない場合の半分以下となった。

図 5.7 に突起の SEM 写真を示す。(a)工具引き上げ動作を行わない場合と(b)工具引き上げ動作を行った場合である。工具引き上げ動作を行わない場合、加工深さが  $350\mu\text{m}$  で突起高さが  $287\mu\text{m}$  なのに対し、工具引き上げ動作を行った場合ではそれより加工深さが大きい  $413\mu\text{m}$  であるにもかかわらず突起高さは  $105\mu\text{m}$  となっている。しかも加工孔底面全体の凹凸も小さくなり、突起の成長が抑制されている様子が明らかとなった。このように工具引き上げ動作とポンプによるスラリの加工部分への噴射を効果的に行うことにより、加工孔底面の寸法精度をさらに改善することができるようになるものと考えられる。





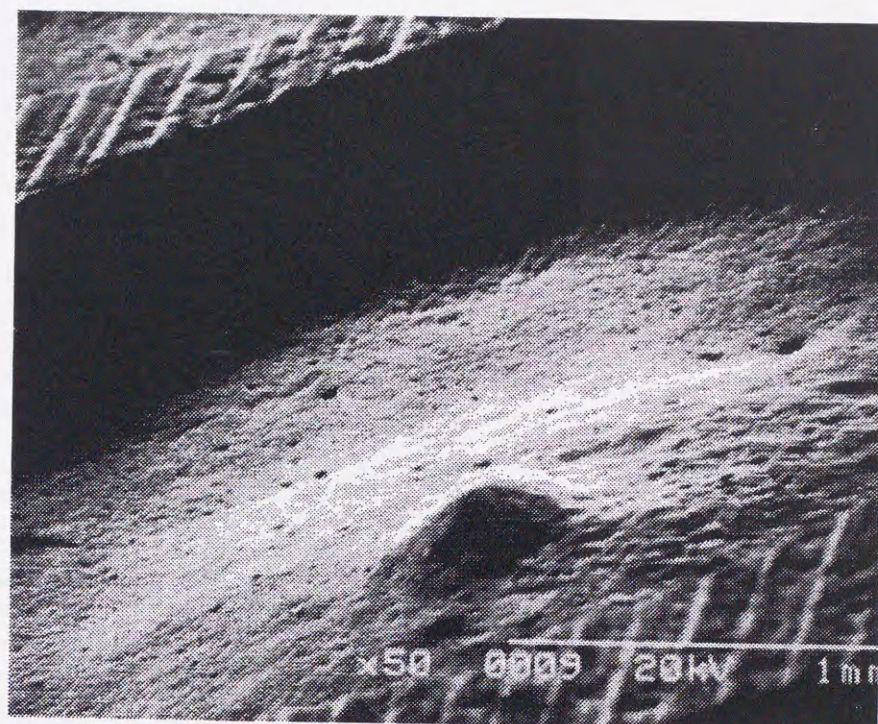
(a)加工深さの変化



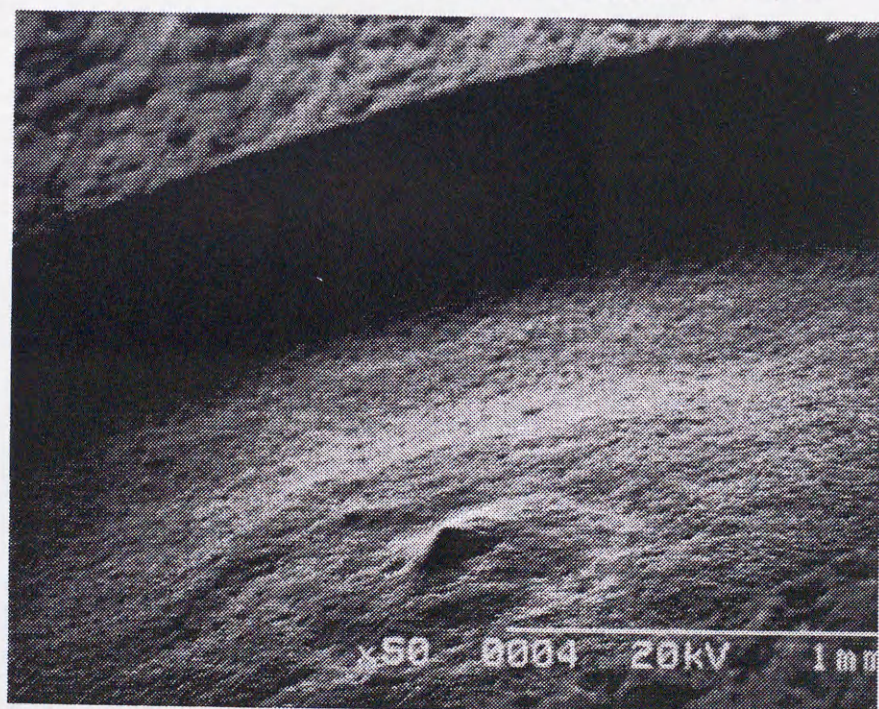
(b)突起高さの変化

図 5.6 工具引き上げ動作による加工深さと突起高さの変化





(a) 工具引き上げ なし  
加工時間 540s, 加工深さ  $350\mu\text{m}$ , 突起高さ  $287\mu\text{m}$



(b) 工具引き上げ あり  
加工時間 871s, 加工深さ  $413\mu\text{m}$ , 突起高さ  $105\mu\text{m}$

図 5.7 工具引き上げ動作による突起高さの抑制



## 5.4 結 言

超音波加工において問題となるキャビテーションによる気泡群の発生について、工具断面形状、加工液の種類を変えて検討した。また加工中に工具引き上げを行うことにより砥粒の供給状態を一様にする方法についてその効果を調べた。

- (1) パイプ状工具を使用した場合、工具肉厚の減少とともにキャビテーションによる気泡群が減少する。工具肉厚が 1.25mm 以下では気泡の発生は不安定となった。
- (2) 工具肉厚が 1.25mm 以下では、加工に与えるキャビテーションの影響を回避することができる。
- (3) 加工液の表面張力、粘性係数を小さくすることにより、加工に与えるキャビテーションの影響を小さくすることができる。エタノールを加工液に使用した場合、発生した気泡の大きさは小さくなった。
- (4) エタノールを使用したスラリを使用して加工した場合、加工能率は水の場合の約 3 倍となった。
- (5) 加工中に工具を工作物表面から一時的に引き上げることにより、加工孔中央に生じる突起高さを半分以下にすることができる。しかし加工能率はほとんど同じである。

## 第 5 章の参考文献

- (1) L.D.Rozenberg, V.F.Kazantsev, L.O.Makarov and D.F.Yakhimovich: ULTRASONIC CUTTING, (英訳 J.E.S.Bradley), ISBN 0-306-10690-6, Consultants, Plenum Pub, 1964.
- (2) K. KIKUCHI et al., An Indirect Vibratory Method Capable of Simulating Several Cavitating States, JSME, 34, 1(1991)175.
- (3) 山崎卓爾, キャビテーション工学, 日刊工業新聞社(1979)10.



- (4) 物理学辞典, 液体の力学的性質, 培風館(1984)2321.
- (5) 東芝シリコーン (株), シリコーンオイル(1996)15.
- (6) 加藤洋治, キャビテーション, 槇書店(1990)186.



## 第6章 結 論

超音波型彫り加工において，加工孔底部の中心付近に突起が形成される．そのため加工形状が劣化する原因となっている．

そこで本研究では以下のことについて明らかにすることを目的とした．

- (1) 加工孔底面の突起生成メカニズムの解明．
- (2) 止まり孔加工時における加工の停滞現象の解明と対策．

本論文の内容を以下に要約する．

第1章 [序論]では，超音波加工の原理を示し，その用途および加工例について述べた．そして超音波加工の特徴および問題点を指摘した．またこれまでの研究成果を列挙し，本研究の目的と工学および工業的意義について示した．

第2章 [超音波加工機の構成と仕様およびホーンの設計]では本実験で使用する超音波加工機の構成およびホーンの設計指針について示した．超音波加工機のホーンは振動子内で発生した振動を拡大して工具へ伝達するものである．そのため内部損失のできるだけ少ない形状のものを設計する必要がある．そこでホーンの形状について検討し，具体的な寸法決定に至るまでの計算手順を示した．また工具，砥粒および工作物の特性を示した．

第3章 [超音波型彫り加工における加工の停滞現象について]では，加工時間と加工深さが比例せず，工具の断面積が大きくなるほど顕著に現れる超音波型彫り加工の停滞現象について実験を行った．そしてこの現象が加工孔の中心部に発生する突起と工具の直接接触による突き当たりによって生じることを明らかにした．またこの突起の核は加工表面粗さの結果から，加工孔の中心部より周辺部の砥粒径が大きいことで発生することを明らかにした．

同時に加工中の工具と工作物間の距離すなわち加工クリアランスの算出を行うこと



により、加工中は工具と工作物の間には砥粒が一層分しか存在していないことも明らかにした。

以上のことから超音波型彫り加工は工具のハンマリングにより行われ、加工孔の中央部に放射状の溝を持った菊型の盛上がり形成されること、それが加工深さの増加とともに突起へと成長し、工具と突き当たりを起こして加工の停滞現象を発生させることを明らかにした。

第4章 [超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動]では、工具直径が加工孔中心部の突起形成過程にどのような影響を与えるかについて実験を行った。また加工中に工具端面と工作物の間に存在する砥粒の粒径分布を測定するとともに、砥粒挙動を高速度カメラで観察し、突起形成のメカニズムを明らかにした。

それにより加工孔中心部の突起は形成、成長、先鋭化、破碎そして再成長の過程を繰り返し、その周期は工具径とともに大きくなることを明らかにした。しかし直径 8mm の工具では砥粒が加工孔へ十分侵入せず加工が停止してしまうことも明らかにした。これは工具のポンピング作用では説明のつかない現象である。そこで CCD カメラにより砥粒の挙動を工具真下から観察した。その結果、工具・工作物の界面にキャビテーションが発生し、これが加工孔への砥粒の侵入を妨げていることを明らかにした。そのため加工孔中心部の砥粒は更新されにくく加工能率が低下し、突起が形成されることも明らかにした。同時に加工孔への砥粒の侵入は工具径が小さく加工クリアランスが大きいほど増加することも明らかにした。

第5章 [超音波型彫り加工で発生するキャビテーションと工具・工作物間の砥粒の挙動]では、キャビテーションの発生が加工孔への砥粒侵入に及ぼす影響について実験を行った。同時に工具をパイプ状にして肉厚を変化させてキャビテーションの発生形態や加工液の特性の違いによる加工速度への影響についても実験を行った。

その結果、キャビテーションが発生すると加工孔への砥粒侵入が困難となり加工速度が低下し、著しい場合には加工不能となることを明らかにした。しかしパイプ状工具で肉厚の薄い場合すなわち 1.25mm 以下では、加工に与えるキャビテーションの影響を回



避することができるため加工速度や加工量が増加することを明らかにした。

次に加工液とキャビテーションの関係を調べるため直径 4mm の中実工具によりエタノール、水そしてシリコンオイルを用いて加工部分を浸漬状態にして（加工液の流速の影響を除く）加工速度を比較した。その結果、エタノールの加工速度が最も大きく、水そしてシリコンオイルの順となることを示した。その理由として CCD カメラによる観察結果から、キャビテーションの発生の度合いがそれぞれ異なるためであることを明らかにした。すなわちエタノール、水そしてシリコンオイルの順にキャビテーションの大きさが増加していることを明らかにした。これにより加工孔への砥粒の侵入も困難となり加工速度が低下することを明らかにした。

また水の加工速度がポンプを用いて加工部分へ噴射した場合と比較して数分の一となることから、加工液の噴射の効果も明らかにした。なお水やシリコンオイルではキャビテーションが工具中央にとどまるため浸漬状態で加工した場合、ほとんど砥粒が加工孔へ侵入せず加工が進行しないことも明らかにした。

以上のことから加工部分を密閉して高圧力状態にでもしない限り、どの加工液であってもキャビテーションの発生を回避することは困難であると考えられる。したがって、このキャビテーションの発生を許容しつつ突起高さを抑える方法として、加工中に工具を工作物表面から砥粒径以上の高さに定期的に引き上げる方法を導入した。それは工具の送り量を一定量毎に検出することにより行った。その結果、突起高さを従来の 50% 以下にすることができることを明らかにした。



## 本研究に関連する論文および口頭発表

### 論文

- (1) 斎藤, 庄司, 厨川:超音波型彫り加工における加工の停滞現象について (第1報) 砥粒加工学会誌, 42, 12(1998)514.
- (2) 斎藤, 厨川, 庄司:超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動 (第2報), 砥粒加工学会誌, (掲載予定)

### 国際学会口頭発表

- (1) SAITOH, SYOJI and KURIYAGAWA: STAGNANCY OF MACHINING PROCESS IN ULTRASONIC DIE SINKING, 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN ABRASIVE TECHNOLOGY, Shanghai , (1998)235.

### 口頭発表

- (1) 斎藤, 庄司, 厨川:超音波加工に関する研究, 1996 年度砥粒加工学会学術講演会, (1996)64.
- (2) 斎藤, 庄司, 厨川:超音波型彫り加工における加工の停滞現象について, 1998 年度砥粒加工学会学術講演会, (1998)306.
- (3) 斎藤, 厨川, 庄司:超音波型彫り加工における加工の停滞と回復について, 1998 年度精密工学会東北支部学術講演会, (1998)61.
- (4) 本郷, 斎藤:超音波加工に関する研究, 日本機械学会東北学生会第29回卒業研究発表講演会, (1999)109.
- (5) 斎藤, 厨川, 庄司:超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動, 1999 年度砥粒加工学会学術講演会, (1999)165.
- (6) 斎藤, 厨川, 庄司:SiC の超音波型彫り加工の砥粒挙動と突起高さについて, 1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (1999)184.



## 機械工作に関する論文

- (1) 斎藤,松井:砥石表面トポグラフィ評価に関する一考察, 砥粒加工学会誌, 39,6 (1995)307.
- (2) 斎藤,松井:研削砥石の有効切れ刃に関する一考察, 砥粒加工学会誌,40,5(1996)254.
- (3) 松井, 斎藤,今野: 砥石表面トポグラフィ評価に関する研究, 砥粒加工学会誌, 42,8 (1998)332.
- (4) 斎藤,松井:研削機構に及ぼす強制振動の影響ー研削仕上面粗さについてー, 東北学院大学工学部研究報告,29,2(1995)1.
- (5) 斎藤,松井:研削仕上面粗さに及ぼす砥石切込量の影響, 東北学院大学工学部研究報告,30,2(1996)9.
- (6) 斎藤,松井:研削砥石の減耗状態の評価に関する一考察, 東北学院大学工学部研究報告,30,1(1995)1.
- (7) 斎藤,松井:研削仕上面の平行粗さ粗さに関する研究, 東北学院大学工学部研究報告,30,1(1996)1.
- (8) 斎藤,松井:研削仕上面粗さに及ぼす砥粒切れ刃先端角の影響, 東北学院大学工学部研究報告,31,2(1997)1.
- (9) 斎藤,松井,佐々木:導電性セラミックスのワイヤ放電加工に関する研究, 東北学院大学工学部研究報告,32,1(1997)1.
- (10) 斎藤,松井:研削機構に及ぼす強制振動の影響 (第2報)ー研削特性値についてー, 東北学院大学工学部研究報告,32,1(1997)7.
- (11) 斎藤,松井,佐々木:導電性セラミックスの型彫り放電加工に関する研究, 東北学院大学工学部研究報告,32,2(1998)1.
- (12) 斎藤,松井:砥石表面トポグラフィ評価に関する一考察, 東北学院大学工学部研究報告,32,2(1998)7.
- (13) 斎藤,松井:研削抵抗に関する一考察, 東北学院大学工学部研究報告,33,1(1998)1.



## 謝 辞

本論文は、東北大学大学院工学研究科教授庄司克雄博士の懇情なるご指導のもとに完成させたものであります。ここに心より厚く感謝の意を表します。また本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬご指導をいただきました同研究科助教授厨川常元博士に深く感謝の意を表します。さらに本論文をまとめるにあたり、適切なご助言とご教示を賜りました同研究科教授清野慧博士ならびに長南征二博士に厚くお礼申し上げます。

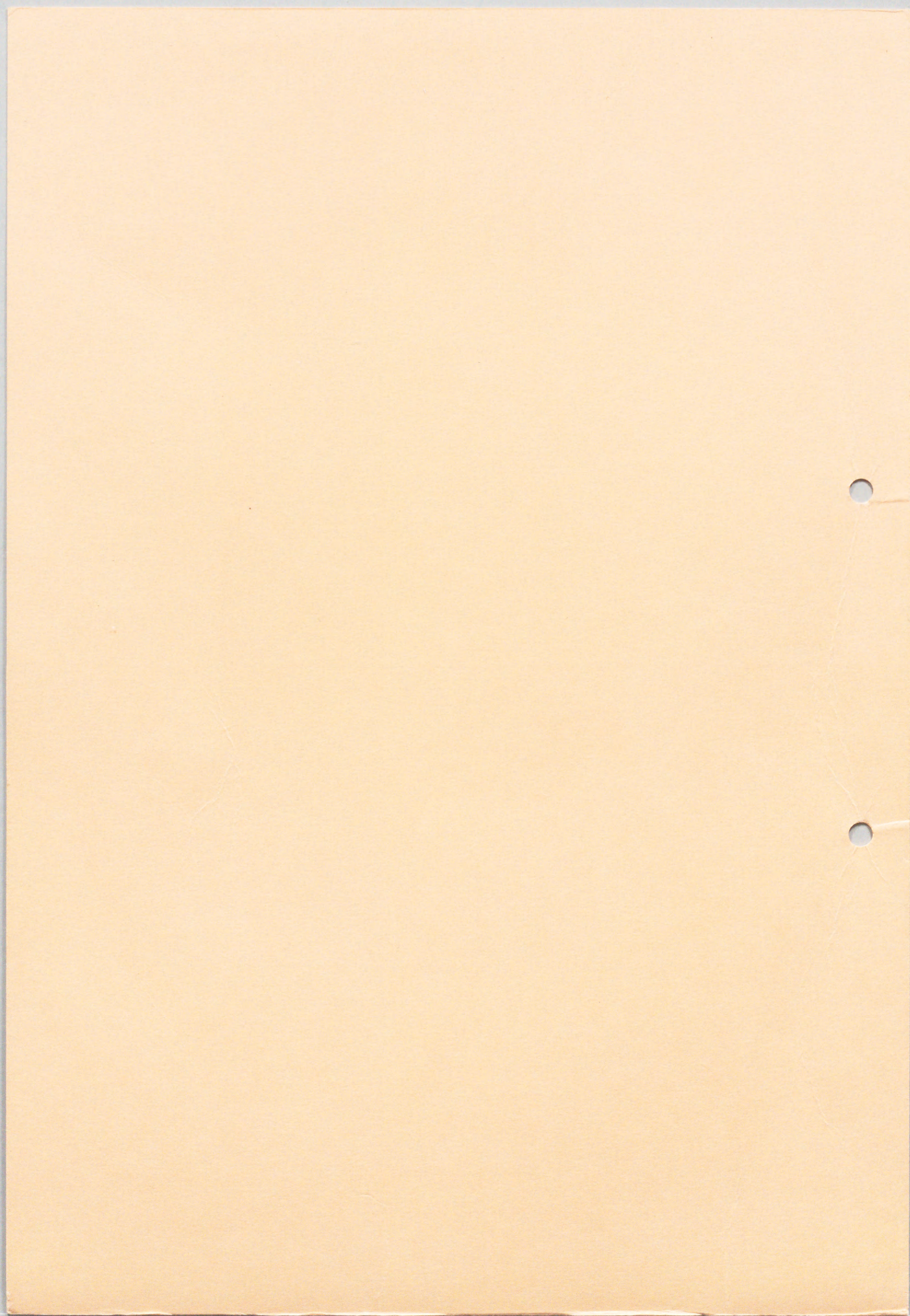
本研究は平成8年の4月1日に社会人特別選抜による学生として前東北学院、情野鉄雄理事長の許可を得て東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻博士課程の後期課程に編入学して行われました。この入学には平成10年度に定年退職された松井正己教授の熱心なご助言があり決心しました。本研究を遂行するにあたり適切なご助言とご教示を賜りました東北学院大学工学部教授箱守京次郎博士ならびに同学部教授大島亮一郎博士に厚くお礼申し上げます。同時に職場の教職員の多大なご協力があり誠に感謝しております。

また研究を開始するにあたり貴重なご助言をいただきました日本電子工業株式会社技術部部長、楡井耕次氏および超音波加工機の分解、運搬そして組立にご協力いただいた東北大学技官、田中憲司氏に深く感謝の意を表します。

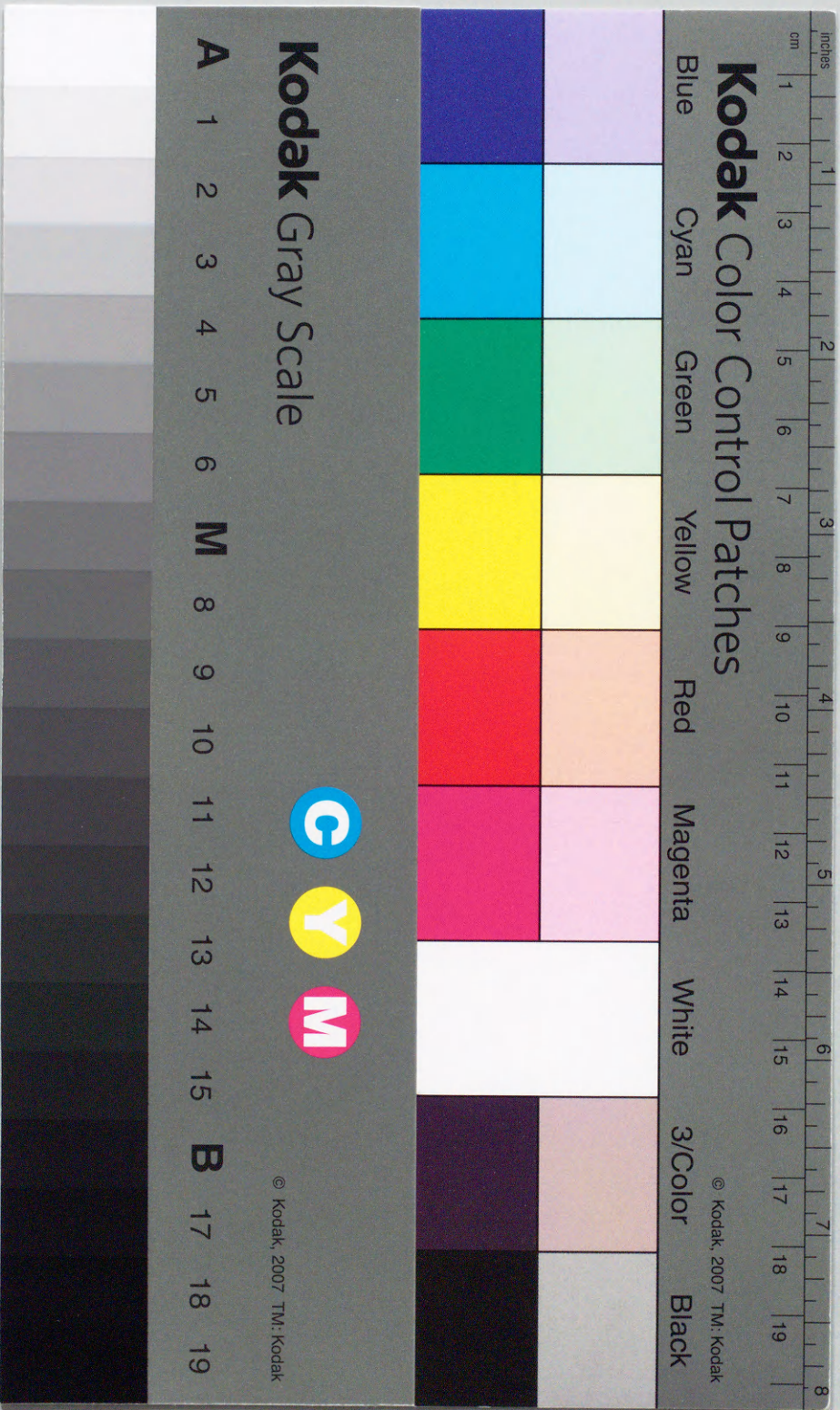
最後に本学大学院工学研究科博士課程において行われた研究は現職（東北学院大学機械工学科）と並行して行われたものであり、講義、演習ならびに卒業研修等が重なり時間的、精神的にも非常に厳しい状況にありました。また胆石の手術も重なり自分にとって大変貴重な経験をさせていただきました。その間、常に励ましをいただいた両親（父昭治、母信子）、妻（千秋）、長女（あかね）そして長男（光貴）に心から感謝します。

1999年12月









# Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

© Kodak, 2007 TM: Kodak

## Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19